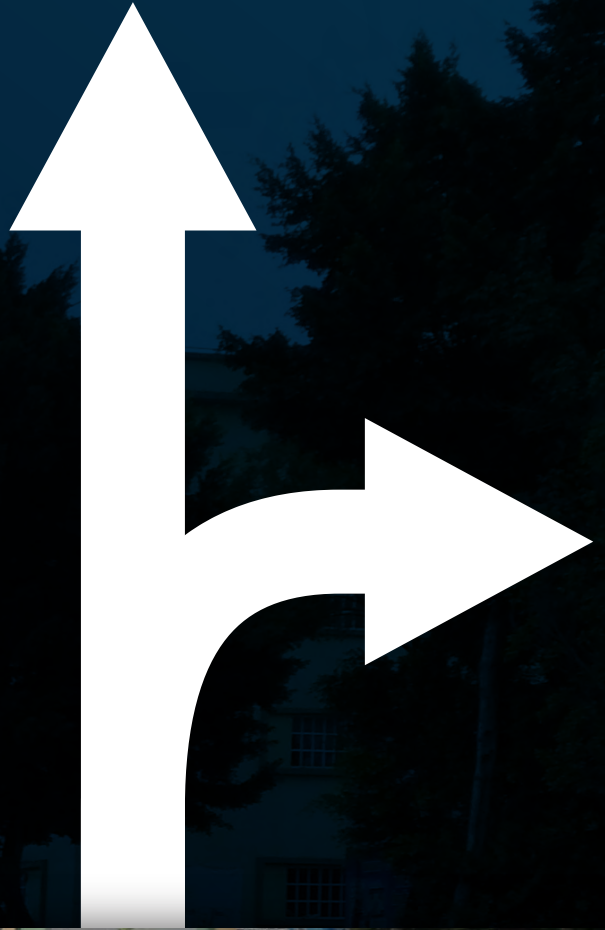


Angélica Lozano Cuevas
José Holguín-Veras
Coordinadores

Estudios Iberoamericanos en Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística



Estudios Iberoamericanos en Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística

Coordinadores:

Angélica Lozano

Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

José Holguín-Veras

*Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer
Polytechnic Institute*

2020

Estudios Iberoamericanos en Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística

Primera edición: abril de 2020

D.R.© 2020 **Universidad Nacional Autónoma de México**



El cuidado de la edición estuvo a cargo de la Unidad de Promoción y Comunicación del Instituto de Ingeniería, de la Universidad Autónoma de México (IIUNAM).
Coordinadores de contenidos: Angélica Lozano Cuevas (IIUNAM) y José Holguín-Veras (*Department of Civil and Environmental Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute*).

Esta obra se encuentra disponible en <http://www.iingen.unam.mx> y está bajo un esquema de licenciamiento *Creative Commons*. Para su uso deben respetarse los términos especificados en [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional](#).

Instituto de Ingeniería, UNAM
Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México

Hecho en México

ISBN 978-607-30-3091-5

CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| PRÓLOGO | 1 |
| SECCIÓN 1. TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS | |
| URBAN PASSENGER TRANSPORT | |
| 1-Factors that influence walking to elementary schools in a Brazilian medium-sized city <i>S. da Penha & M. Garcia</i> | 5 |
| 2-Assessment of the sustainable performance of urban-passenger transport using Probabilistic Composition of Preferences <i>V.de Almeida, I. Leal & P. de Almada</i> | 17 |
| 3-Demand adjustment for the transit network of Mexico City and its surroundings <i>M. Chávez & L. Juárez</i> | 33 |
| 4-Análise preliminar das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) no BRT Sul de Brasília/DF a partir da usabilidade <i>R. da Silva, E. Cavalcante, J. Matsuo & A. Pallavicini</i> | 49 |
| 5-Los trolebuses y la electromovilidad en la Ciudad de México: ¿evolución o involución? <i>F.. Alvarado</i> | 65 |
| 6-Conflitos de regulação entre os serviços de táxis e o Uber no Brasil: disputa de mercado sem foco na qualidade da mobilidade urbana <i>L. de Souza & M. Oliveira</i> | 81 |
| 7-Mobilidade, um termo a dissecar <i>H. Araújo & R. Faria</i> | 97 |
| SECCIÓN 2. TRANSPORTE MEDIANTE BICICLETA | |
| BICYCLE TRANSPORTATION | |
| 8-A metaheuristic approach for the repositioning problem in bike sharing systems (BSS): a study case in Toluca, Mexico <i>J. García, M. González & J. Romero</i> | 113 |
| 9-Modelo de elección de la bicicleta pública y privada incluyendo variables latentes <i>O. Arbeláez, I. Sarmiento & J. Córdoba</i> | 127 |
| 10-Sistema de compartilhamento de bicicletas: um estudo de viabilidade em uma universidade brasileira <i>C. Moura, P. Gonzales & Z. Oliveira</i> | 145 |
| 11-Identification of potential cyclists in a university campus <i>M. Garcia & S. da Penha</i> | 159 |

SECCIÓN 3. MODELOS DE REDES Y EQUILIBRIO OFERTA-DEMANDA DE TRANSPORTE

NETWORK MODELS AND SUPPLY-DEMAND BALANCE FOR TRANSPORTATION

| | |
|---|-----|
| 12-Flow-queue-time dependent traffic modelling for urban networks | |
| <i>G. Londoño & A. Lozano</i> | 177 |
| 13-Assessing strategies for reducing transportation services within an urban transit network | |
| <i>F. Ortega , J.. Mesa, M. Pozo & J. Puerto</i> | 187 |
| 14-Elaboração de linhas alimentadoras para as cidades do Gama e de Santa Maria dentro do Modelo Tronco-Alimentado da Rede de Linhas do BRT Sul de Brasília/DF | |
| <i>R. da Silva, E. Cavalcante, J. Matsuo, T. Luiz & A. Silva</i> | 201 |
| 15-Estimación de la matriz origen-destino de los viajes en el sistema de transporte interno de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México | |
| <i>S. Cifuentes & A. Lozano</i> | 219 |
| 16-Diagnóstico del tiempo de espera en los módulos del sistema Bicipuma a través de la simulación | |
| <i>R. Torres & E. Segura</i> | 237 |
| 17-Exact model for LTL Location-Routing Problem | |
| <i>A. Alarcon & N. Fares</i> | 253 |
| 18-Models for estimating the travel time variability of air transportation | |
| <i>F. David, A. Larrañaga & L. dos Santos</i> | 269 |

SECCIÓN 4. DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

URBAN DISTRIBUTION OF GOODS

| | |
|---|-----|
| 19-Distribución urbana de mercancías en la Ciudad de México: tendencias corporativas y políticas públicas | |
| <i>J. Antún † & R. Alarcón</i> | 288 |
| 20-Aplicación del modelo VRP (Vehicle Routing Problem) para la optimización de una red de distribución | |
| <i>F. Sánchez & E. Segura</i> | 306 |
| 21-Optimización de una red de distribución de un material peligroso al norte de la ciudad de México | |
| <i>E. Segura, A. Wellens, A. Gómez, N. Rojas & D. Tello</i> | 324 |

| | |
|--|-----|
| 22-Propuesta para la distribución de cerveza en el centro histórico de Coyoacán | |
| <i>L.Mota & A. Lozano</i> | 340 |
| 23-Alternativas de solución para el Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos de la Delegación La Magdalena Contreras | |
| <i>Z. Alarcón, R. Aceves & O. Rivas</i> | 356 |
| 24-Diseño de rutas de recolección de residuos sólidos en Ciudad Universitaria | |
| <i>C. Enríquez & A. Lozano</i> | 370 |

SECCIÓN 5. LOGÍSTICA Y TRANSPORTE DE CARGA

LOGISTICS AND FREIGHT TRANSPORTATION

| | |
|---|-----|
| 25- Governance in intelligent logistics platforms through information and communication technology | |
| <i>L. Varella, M. Buss, R. Meyer & O. Fontes</i> | 382 |
| 26-Localización de parques industriales con enfoque de optimización y análisis multicriterio en México | |
| <i>L. Vázquez & E. Segura</i> | 394 |
| 27-Análisis de la capacidad y niveles de servicio de la vía como factores incidentes en los tiempos logísticos usando dinámica de sistemas | |
| <i>C. Serna, M. Arango & M. Ortiz</i> | 410 |
| 28-Generación de un índice en transporte urbano de carga en ciudades mexicanas: Desafíos metodológicos para una investigación nacional | |
| <i>E. Betanzo, M. Toral, J. Romero & S. Obregón</i> | 428 |
| 29- Simulación de la logística del transporte en TRANUS Caso de estudio: movilización de productos y subproductos de la Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela | |
| <i>P. López</i> | 446 |
| 30-Accidentalidad y logística del transporte de materiales y residuos peligrosos | |
| <i>M. Saucedo, A. Cuevas, J. Pérez & A. Mendoza</i> | 458 |
| 31-Modelo de impacto socioeconómico para la construcción de un corredor ferroviario de mercancías en Extremadura (España) | |
| <i>J. Coloma & M. García</i> | 474 |
| 32-Análise dos investimentos para o desenvolvimento do arco norte brasileiro com uma matriz rodo-hidroviária | |
| <i>E. Bulhões, B. Cavalcante, T. Carvalho, G. Magela, G. Moura & T. Vasconcelos</i> .. | 496 |
| 33-Modelación de elección portuaria: un enfoque de autómatas celulares probabilísticos | |
| <i>M. Leva, A. León, R. Garrido & A. Ibeas</i> | 510 |

SECCIÓN 6. LOGÍSTICA HUMANITARIA

HUMANITARIAN LOGISTICS

| | |
|---|-----|
| 34-Modelagem e simulação dos processos de aquisição e transporte em desastres <i>F. Santos , R. Villarroel & M. Buss</i> | 526 |
| 35-A methodology to develop a multi-criteria framework for a reliable aid distribution <i>F. Regis, J. Mora & A. Ruiz</i> | 544 |
| 36-Modelo de empacotamento de suprimentos em veículos para distribuição de ajuda humanitária na última milha <i>J. Souza, L. Varella & M. Buss</i> | 562 |
| 37-Controle de multidões em situações de emergência - contribuições dos princípios de logística <i>J. Souza</i> | 572 |

SECCIÓN 7. INGENIERÍA DE TRÁNSITO

TRAFFIC ENGINEERING

| | |
|--|-----|
| 38-Microsimulación de peatones en ambientes universitarios <i>F. Cabrera , M. Sabino, G.Legua</i> | 588 |
| 39-Simulación microscópica de flujos vehiculares en una vía rápida para una zona urbana <i>D. Espejel, G. Wenglas, V. Espejel, A. Villalobos & J. Saniger</i> | 604 |
| 40-Evaluación del impacto social de un modelo matemático para la transición entre planes de semaforización. Caso de estudio Paseo General Dávila de la ciudad de Santander, España <i>R. Peñabaena , V. Cantillo & J. Moura</i> | 618 |
| 41-Planning for the implementation of an adaptative traffic control system <i>A. Lozano, F. Granados & A. Guzmán</i> | 636 |

SECCIÓN 8. TRANSPORTE Y USO DEL SUELO

TRANSPORT AND LAND USE

| | |
|--|-----|
| 42-Desenvolvimento e calibração de método de geração de viagens para empreendimentos hoteleiros <i>H. Araújo & R. Faria</i> | 653 |
| 43-El tráfico generado por proyectos inmobiliarios en la ciudad de Lima <i>F. Cabrera</i> | 669 |
| 44-Geração de renda urbana, mobilidade e as metrópoles <i>C. Garcez & L. dos Santos</i> | 681 |

45-Análisis del impacto de los desarrollos habitacionales de Misión Vivienda en el sistema de transporte del Área Metropolitana de Caracas, Venezuela

A. García 697

46-Planificación del estacionamiento vehicular en campus universitarios, un cambio de paradigma: caso Bogotá, Colombia

F. Espejo & D. Pérez..... 711

47-La utilización de la teoría de autómatas celulares para la predicción del cambio de uso del suelo y la influencia de la red vial. Caso de estudio: Santo Tomás y San Miguel Ajusco, D.F., México

G. Camacho..... 729

SECCIÓN 9. INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

TRANSPORT INFRASTRUCTURE

48-Simulation and optimization for urban transport infrastructure

I. Flores & E. Segura 747

49-Análisis de rentabilidad de la concesión de autopistas en operación en México

L. Rocha, A. Sánchez & M. Rivas 759

50-Financial feasibility of pipeline and road modes integration for ethanol transportation in Brazil

M. Vargas, I. Leal, P. Teodoro, V. de Almeida & J. Monteiro 777

51-Plataforma geográfica para la gestión de información de características físicas y de operación de la red carretera federal

A. Cuevas, J. Pérez & G. Ríos 793

52-Parámetros físicos asociados con la fricción en el diseño geométrico de vías

L. Sánchez & J. Posada..... 807

53-Estudo das patologias de pavimentação na região central de Formosa/Goiás/Brasil

W. Rodrigues & J. da Silva 823

54-Mezclas asfálticas tibias: una alternativa eficaz para la construcción de pavimentos medioambientalmente amigables

J. Córdoba, V. Senior & D. Posada 835

55-Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante con el uso de fibra acrílica como aditivo

Y. Yung, J. Córdoba & H. Rondón 849

SECCIÓN 10. SEGURIDAD EN SISTEMAS TRANSPORTE

SECURITY IN TRANSPORTATION SYSTEMS

56-Factores que afectan la severidad de accidentes urbanos. El caso de Cartagena de Indias

C. Díaz, V. Cantillo & L. Márquez..... 863

57-A preliminary accident analysis of three Bus Rapid Transit cases in Mexico City

V. Ávalos & J. Santos..... 879

58-Validación de la aplicabilidad de la metodología del Highway Safety Manual-2010 (HSM-2010) para la predicción del número de accidentes de tránsito en vías multicarril en la ciudad de Bogotá

S. Ramírez & Y. Ruiz 893

59-Elementos para una gestión efectiva de la seguridad vial en México

A. Mendoza & N. Gómez..... 905

60-Ocorrências de acidentes em rodovias e sua correlação com outras variáveis relevantes: Estudo de caso em Pernambuco, Brasil

M.Pina & A. Brasileiro 923

61-Participación de usuario vulnerable en la siniestralidad de las carreteras mexicanas

E. Mayoral & A. Cuevas 939

62-Análise dos roubos de cargas no sul do Brasil

M.Pinheiro, L. Dexheimer & F. David..... 957

63-Uso de simulador de conducción para evaluar el desempeño de seguridad en plazas de peaje en Puerto Rico

D. Valdés, B. Colucci, J. Ruiz, B. Ruiz, R. García & E. Colón 973

64-Análisis internacional: la concentración y habilidad para conducir

F. Pereira 993

65-Construcción de un modelo de red vial georreferenciado para la gestión de información de accidentes viales y otras características físicas y operativas

N. Villegas & A. Mendoza 1003

ÍNDICE DE AUTORES.....1019

PRÓLOGO

En la Región Panamericana, la comunidad científica y profesional ha hecho esfuerzos para tratar de resolver los difíciles problemas de tráfico, transporte y logística a los que se enfrenta, los cuales en muchos casos son peculiares por la idiosincrasia y reglamentación (o falta de ésta) del lugar donde se presentan. Los problemas frecuentemente se complican por la falta de información confiable y actualizada.

Los especialistas en la materia en esta Región, provienen de la academia y de los sectores público y privado. Los estudios que realizan incluyen aspectos teóricos, metodológicos y casos de estudio, abordados desde la ingeniería y otras áreas del conocimiento. La escala de análisis va desde regional y nacional, pasando a urbana (metropolitana) y local, hasta llegar a corredores e intersecciones.

Los conocimientos y experiencias de estos estudios requieren ser conocidos por la comunidad de especialistas en la Región, con el fin de retroalimentarla y contribuir a lograr una mejor solución de los problemas. El conocimiento de los aciertos y dificultades derivados de los estudios es muy valioso por lo que debe ser difundido entre esta comunidad.

La activa participación de los sectores académico, público y privado, sobre esta temática, ha conformado la *Sociedad Panamericana de Investigación en Transporte y Logística* (recientemente formalizada) que desde 1980 ha impulsado el desarrollo del *Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística* (PANAM), el cual permite el intercambio de ideas entre la comunidad y publica las memorias del evento con trabajos de extensión limitada.

De la situación antes descrita se desprende que aún existen grandes tareas pendientes en el ámbito académico de difusión. Es por eso que, con el fin de avanzar en la difusión del conocimiento sobre la materia en la Región, se determinó la elaboración de un libro con capítulos sobre cada uno de los temas más relevantes actualmente, con una revisión por pares de los trabajos incluidos. De ahí surgió el presente libro llamado “Estudios Iberoamericanos en Ingeniería de Tránsito, Transporte y Logística”, que incluye estudios de 12 países en los tres idiomas oficiales de la Región

El libro está organizado en 10 secciones, cada una sobre un tema relevante que incluye trabajos con varios enfoques. La primera sección se refiere al transporte urbano de pasajeros. Contiene siete trabajos que analizan el uso de diferentes modos tales como autobús, metro, BRT (Bus Rapid Transit), trolebús, taxi y caminar. Algunos trabajos identifican y describen problemas de interés, otros más utilizan técnicas variadas (regresión, composición probabilista de preferencias, gradiente conjugado, análisis multi-

criterio, entre otras) para resolver casos de estudio. La sección siguiente contiene cinco trabajos sobre transporte en bicicleta (pública o privada), que tratan desde las dificultades hasta los beneficios, mediante análisis con diversas técnicas.

La tercera sección contiene ocho trabajos sobre modelos de redes y equilibrio oferta-demanda de transporte. Los trabajos tienen principalmente un enfoque teórico y metodológico, e incluyen problemas que van desde tráfico vehicular, transporte público, bicicletas, distribución de mercancías y transporte aéreo.

Debido al creciente interés por la distribución urbana de mercancías, la sección cuarta está dedicada a ésta e incluye seis trabajos que describen y resuelven casos de estudio. La sección quinta está enfocada a logística y transporte de carga. Contiene nueve trabajos que tratan problemas de plataformas logísticas multimodales, operaciones logísticas, transporte de materiales peligrosos y transporte mediante camiones, trenes y barcos.

La logística humanitaria es otro tema cada vez más relevante en virtud de la gran vulnerabilidad en nuestra Región, por lo que la sexta sección está dedicada a ésta a través de cuatro trabajos. Los trabajos abordan el problema de la distribución de la ayuda pos-desastre (mediante simulación, análisis multi-criterio y ruteo de vehículos) y el problema de evacuación de personas en la zona afectada.

La sección siete incluye cinco trabajos sobre ingeniería de tránsito, tema muy importante por los impactos negativos de la congestión en el medio ambiente y en la calidad de vida de la población. Se presentan casos de simulación microscópica de peatones y vehículos, evaluación de planes semafóricos y planificación de sistemas adaptativos de control del tráfico.

La sección 8 incluye seis trabajos sobre transporte y uso de suelo, lo cual es muy relevante debido al deficiente ordenamiento territorial en varios países de la Región. Estos trabajos principalmente abordan la generación de viajes y el análisis de impactos, por cambios de uso de suelo.

La sección nueve incluye 10 trabajos sobre infraestructura del transporte, los cuales tocan temas de operación, impactos, financiamiento, rentabilidad, confiabilidad y características físicas, así como de información sobre características físicas y operativas.

Finalmente, la sección 10 trata sobre la seguridad en sistemas de transporte, que es un tema de gran trascendencia. Incluye nueve trabajos sobre seguridad, accidentabilidad y robos, con análisis que utilizan distintas técnicas.

Agradecemos profundamente a los revisores anónimos por sus valiosas sugerencias para enriquecer y mejorar el libro. Un agradecimiento a Brenda Cerda y a Sonia Briceño,

respectivamente por darle formato a los documentos que integran el libro y por la comunicación con los autores en la fase de revisión y corrección. También agradecemos a todos los miembros del *Grupo de Investigación en Ingeniería de Transporte y Logística*, por su colaboración en diversas tareas que permitieron culminar con la publicación de este libro, en especial a Francisco Granados y Alejandro Guzmán.

Por último, agradecemos enormemente al *Instituto de Ingeniería* de la *Universidad Nacional Autónoma de México*, por apoyar la publicación de este libro.

Angélica Lozano y José Holguín-Veras

SECCIÓN 1

TRANSPORTE URBANO DE PASAJEROS

URBAN PASSENGER TRANSPORT

1 Factors that influence walking to elementary schools in a Brazilian medium-sized city

Suely da Penha Sanches

Marcos Antonio Garcia Ferreira

Federal University of São Carlos, Brazil

ABSTRACT

The objective of this paper is to identify what are the factors that influence the odds of children walking to school in a Brazilian medium-sized city. A survey was conducted with parents of 1st to 4th grade students from four public schools, by means of a questionnaire that was carried home and brought back by the students. The descriptive and regression outcomes show that the most influential factors are the following: distance to be travelled, social approval, availability of cars in the household and parents' perception of safety on the route from home to school.

Keywords: Walking to school, children's mobility, travel to school

1. INTRODUCTION

In recent decades, Brazilian cities have shown a significant change in the modes of transport used by children to access school. It has been observed that most trips, that a few years ago were made on foot, are now made on motorized transportation modes (Rosa, 2010; Costa et al., 2012). This change in the modes of transport used to go to school is a growing problem, both for the transport and the public health points of view.

Schools are significant trip generation poles and, as more children are traveling to school by car, traffic congestion in the areas around schools causes negative impacts on traffic throughout the city.

Moreover, there is a consensus among planners and researchers in the health field that the modes of transport used by children to access schools is becoming increasingly important (Mackett et al., 2005; McMillan, 2007, Silva and Lopes, 2008). Studies conducted in Brazil have shown that the prevalence of childhood obesity affects 30% of children and adolescents (Duarte Silva and Sanches, 2008; Silva and Lopes, 2008). Using an active mode for the trips to school provides a very significant opportunity for physical activity, encouraging healthy lifestyles (that can last throughout adulthood). This may prevent the incidence of chronic diseases and also contribute to reduce levels of obesity. Children and adolescents who use active modes on their trips to school tend to use them also for their other trips, and there is

growing evidence that children who are more active have better physical and psychosocial conditions (Panter et al., 2010; Goeverden and Boer, 2010).

In this context, this article aims to identify what are the factors that influence the odds of children walking to school. The focus of the research was students who attend public elementary schools (aged between 6 and 10 years) located in a Brazilian medium-sized city.

2. FACTORS THAT INFLUENCE THE MEANS OF TRANSPORT TO SCHOOL

A literature review on this subject indicated that many factors influence the selection of the transport mode for children's trips to school. These factors may be grouped into five categories: child characteristics, characteristics of parents or guardians, households' characteristics, social approval and characteristics of the home-school route (including the distance).

a) Characteristics of the child

The literature points that the characteristics of children that influence the modal choice are age and gender. Older children are more likely to use non-motorized transport modes and public transport (McDonald, 2007) and are less likely to be accompanied by their parents on trips to school (Vovsha and Petersen, 2004). Girls are less likely to use non-motorized transport modes or public transport (McDonald, 2007).

b) Characteristics of the parents or guardians

The final decision about travel to school is most often made by the parents, not by the children (McMillan, 2007). Therefore, the travel decision depends on the schedule, constraints and preferences of the parents and their beliefs, perceptions and attitudes about travel by different modes (Yarlagadda and Srinivasan, 2008; Schollossberg et al., 2006; Shengxia and Pegnjun, 2015).

c) Characteristics of the households

Several empirical studies have indicated a strong correlation between the socioeconomic characteristics of the households and the choice of the transport mode for trips to school. The higher the income and car availability, the less likely walking or using public transport when children travel to school (Sanches et al., 2009; Zwerts and Wets, 2006; McDonald, 2007; McMillan, 2007).

d) Social approval

The parents' perception about social approval if they allow their children to walk to school has been shown to increase the odds of walking (Rosa, 2010, Kelly and Fu, 2014).

d) Characteristics of the route from home to school

The distance to be travelled is, maybe, the most important constraint for walking to school

(Schlossberg et al., 2006; McMillan 2007; McDonald, 2007; Zwerts and Wets, 2006; Christiansen et al., 2014). The perception of parents about the safety and security features of the home to school route also influences the choice of the transport mode (McMillan, 2007, Larsen et al, 2013, Rothman et al, 2015). High incidence of crime and heavy traffic tend to reduce the likelihood of traveling by non-motorized transport modes in the area.

3. METHOD

To collect the data, questionnaires were answered by parents of 1st to 4th grade students that attend four public schools in São Carlos - SP (a medium-sized city of about 240 thousand inhabitants). Questionnaires were sent home and brought back to school by the students.

The information requested in the questionnaire was divided into the following groups:

- Child characteristics (gender and age).
- Household characteristics (availability of an automobile).
- Characteristics of the child's trip to school (modes of transport most frequently used, approximate distance from home to school and who accompanies the child on the trip to school).
- Parents' perception about safety (exposure to traffic) on the way to school. Five items with response options: Yes (0) or No (1). The answer "No" indicates a more positive perception of safety during the journey to school.
 - If your child walks to school, he/she will have to:
 - Cross a wide road (more than four traffic lanes)?
 - Cross a street where there is no traffic light or stop sign?
 - Cross a busy street with no crosswalk?
 - Walk on the road because there is no sidewalk?
 - Walk along streets where vehicles travel at high speed?
- Parents' perception about safety (risk of harassment and assaults) on the way to school. Two items with response option in a Likert type scale ranging from "Strongly agree" (coded as 1) to "Strongly Disagree" (coded as 5). Thus, larger values indicate a greater perception of security on the way to school.
 - My neighborhood is not secure enough for children to walk.
 - I worry that my child may be harassed by strangers on the way to school.
- Parents' perception about social approval if they allow their children to walk to school. Two items with response options ranging from "Totally disapproved" (coded as 1) to "Fully approved" (coded as 5). Higher values indicate greater social approval.
 - What do people think (or will think) of your child walking to school?
 - Your friends
 - Your family

- Parents’ physical activity habit (how often they walk).
Five answer options, regarding their frequency of walking continuously (without stopping) for at least 20 minutes: “At least once a day” (coded as 5), “A few times a week” (coded as 4), “Once a week” (coded as 3), “A few times a month” (coded as 2) and “Hardly ever” (coded as 1). Higher values imply a greater physical activity habit.
- Parents' opinion about walking to school.
Three items with response options ranging from “Very unimportant” (coded as 1) to “Very important” (coded as 5):
 - My child works out when he/she goes and comes back from school.
 - My child interacts with other children on the way to school.
 - My child learns how to walk on the streets by him/herself.

A map of the school area was provided to the parents to indicate the approximate location of their residence. From this map, using a Geographic Information System (TranCAD), the distance from each child’s home to the school along the street network, was calculated.

4. RESULTS

A total of 782 questionnaires were used for the analysis. Table 1 shows the general characteristics of the sample.

The study only asked parents to report the usual modes of transport of their children to school. It was assumed that the same mode was used on the way back. It is possible that the two modes are different (although this is not likely).

4.1. Distance from home to school

Table 2 shows the frequency of home to school distances in relation to the modes of transport used by the child. The “Other” option includes: car, motorcycle, school and public bus.

Data in Table 2 show that the distance from home to school has a strong influence on the mode used to access school (Chi-square test with $p = 0.000$).

| | |
|--------------------|--|
| Gender: | Persons with whom the child goes to school |
| Boys: 346 (44.2%) | Mother, father or other adult: 593 (75.8%) |
| Girls: 436 (55.8%) | Alone or with other children: 189 (24.2%) |
| Age (years): | Modes of transport: |
| 6: 33 (4.2%) | Car / motorcycle: 162 (20.7%) |
| 7: 140 (17.9%) | Walking: 552 (70.6%) |
| 8: 234 (29.9%) | School bus: 58 (7.4%) |
| 9: 146 (18.7%) | Public bus: 10 (1.3%) |
| 10: 159 (20.3%) | Bicycle: 0 (0.0%) |
| > 10: 70 (9.0%) | |

Table 1. General characteristics of the sample

4.2. Characteristics of the children

The age and gender of the children were the two characteristics analyzed. Table 3 shows the relationship between the child's age and the modal choice. Table 4 shows the influence of gender.

There is a general tendency for boys and older students to walk more, but no significant influence of any of these variables on mode choice was found (Chi-square test with $p > 0.05$ in both cases).

4.2. Parents' perception about safety (exposure to traffic) on the way to school

The perception of parents regarding safety was questioned by statements about possible barriers and/or risks that their children would have to face during the home to school trip. For each of the situations, parents could answer: Yes (0) or No (1). Table 5 shows the results.

Table 5 shows that for all situations, the percentage of positive answers from parents of children who walk was smaller. This indicates that these parents have a more positive perception of safety on the route to school, and this may influence their decision about allowing the child to walk.

| Distance | Mode | |
|--------------------------|---|-----------|
| < 500m: 242 (30.9%) | Walk: 200 (82.6%) Other: 42 (17.4%) | p = 0.000 |
| 550m - 750m: 297 (38.0%) | Walk: 212 (71.4%) Other: 85 (28.6%) | |
| > 750 m: 243 (31.1%) | Walk: 140 (57.6%) Other: 103 (42.4%) | |

Table 2. Distance from home to school

| Mode | Age (years) | | | | | | |
|-------------|-------------|------|------|------|------|------|-------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | >11 |
| Walking (%) | 72.2 | 72.1 | 60.7 | 77.7 | 70.4 | 81.4 | 100.0 |
| Other (%) | 27.3 | 27.9 | 39.3 | 22.3 | 29.6 | 18.6 | 0.0 |

Table 3. Relationship between age and mode choice

| Mode | Gender | |
|-------------|--------|-------|
| | Boys | Girls |
| Walking (%) | 71.4 | 69.8 |
| Other (%) | 28.6 | 30.2 |

Table 4. Relationship between gender and mode choice

| | | |
|--|---|-----------|
| Cross a wide road (more than four traffic lanes)? | | |
| No (safe): | Walk: 458 (71.7%) Other: 181 (28.3%) | p = 0.159 |
| Yes (unsafe): | Walk: 94 (65.7%) Other: 49 (34.3%) | |
| Cross a street where there is no traffic light or stop sign? | | |
| No (safe): | Walk: 277 (72.7%) Other: 104 (27.3%) | p = 0.206 |
| Yes (unsafe): | Walk: 275 (68.6%) Other: 126 (31.4%) | |
| Cross a busy street with no crosswalk? | | |
| No (safe): | Walk: 366 (75.5%) Other: 119 (24.5%) | p = 0.000 |
| Yes (unsafe): | Walk: 186 (62.6%) Other: 11 (37.4%) | |
| Walk on the road because there is no sidewalk? | | |
| No (safe): | Walk: 490 (71.8%) Other: 192 (28.2%) | p = 0.043 |
| Yes (unsafe): | Walk: 62 (62.0%) Other: 38 (38.0%) | |
| Walk along streets where vehicles travel in high speed? | | |
| No (safe): 499 | Walk: 395 (79.2%) Other: 104 (20.8%) | p = 0.000 |
| Yes (unsafe): 283 | Walk: 157 (55.5%) Other: 38 (44.5%) | |

Table 5. Parents' perception about safety on the way to school

4.3. Parents' perception about security (personal security) on the way to school

The perception of security on the way to school was assessed by two statements structured in the form of a Likert type scale and were coded with values ranging from "strongly agree" = 1 to "strongly disagree" = 5. It was assumed the parents with answers equal or above 4 consider the way to school to be secure (Table 6).

Overall, parents have a negative perception of security in the neighborhood. It is noteworthy, in this case, the question of the danger of harassment, which almost 90% of the parents consider to be a reason for worry. A chi-square test indicated a significant difference in the perception of security between parents of children who walk and parents of children who use other modes of transport ($p < 0.05$).

4.4. Parents' perception about social approval

In order to assess the social norms accepted by the parents, the questions were related to the approval of friends and family, with response options ranging from: "Totally disapprove"

(1) to “Fully approve” (5). It was considered that answers with values equal or above 4 meant positive social approval.

Table 7 shows that social approval influences mode choice for trips to school. The difference between the two frequency distributions is statistically significant (Chi-square test with $p = 0.000$ in both cases).

4.5. Parents’ physical activity habit (how often they walk)

To evaluate parents’ attitude toward physical activity, the following question was formulated: “How often do you walk continuously (without stopping) for at least 20 minutes?” The options were: “At least once a day” (5), “A few times a week” (4), “Once a week” (3), “A few times a month” (2) and “Hardly ever” (1). Parents were assumed to be active if their answers were equal or above 4. The results are shown in Table 8.

Students who walk have parents or guardians who are also active (walk often). The difference between the two frequency distributions is statistically significant (Chi-square test with $p = 0.008$).

| | | |
|---|---|-------------|
| My neighborhood is not secure enough for children to walk | | |
| ≥ 4 (secure): 227 (29.0%) | Walk: 172 (75.8%) Other: 55 (24.3%) | $p = 0.043$ |
| < 4 (insecure): 555 (71%) | Walk: 380 (68.5%) Other: 175 (31.5%) | |
| I worry that my child may be harassed by strangers on the way to school | | |
| ≥ 4 (secure): 91 (11.6%) | Walk: 75 (82.4%) Other: 16 (17.6%) | $p = 0.008$ |
| < 4 (insecure): 691 (88.4%) | Walk: 477 (69.0%) Other: 214 (31.0%) | |

Table 6. Parents’ perception about security on the way to school

| | | |
|-------------------------|---|-------------|
| Friends | | |
| ≥ 4 (approve): 284 | Walk: 254 (89.4%) Other: 30 (10.6%) | $p = 0.000$ |
| < 4 (disapprove): 498 | Walk: 298 (59.8%) Other: 200 (40.2%) | |
| Family | | |
| ≥ 4 (approve): 306 | Walk: 270 (88.2%) Other: 36 (11.8%) | $p = 0.000$ |
| < 4 (disapprove): 476 | Walk: 282 (59.2%) Other: 194 (40.8%) | |

Table 7. Friends and family approval

| | | |
|--|---|-----------|
| How often do you walk continuously (without stopping) for at least 20 minutes? | | |
| ≥ 4 (active): 550 | Walk: 411 (74.7%) Other: 139 (25.3%) | p = 0.000 |
| < 4 (sedentary): 232 | Walk: 141 (60.8%) Other: 91 (39.2%) | |

Table 8. Parents' habit of walking

| | | |
|--|---|-----------|
| My child works out when he/she goes and comes back from school | | |
| ≥ 4 (positive): 564 | Walk: 401 (71.1%) Other: 163 (28.9%) | p = 0.614 |
| < 4 (negative): 218 | Walk: 151 (69.3%) Other: 67 (30.7%) | |
| My child interacts with other children on the way to school | | |
| ≥ 4 (positive): 540 | Walk: 382 (70.7%) Other: 158 (29.3%) | p = 0.888 |
| < 4 (negative): 242 | Walk: 170 (70.2%) Other: 72 (29.8%) | |
| My child learns how to walk on the streets by him/herself | | |
| ≥ 4 (positive): 554 | Walk: 382 (69.0%) Other: 172 (31.0%) | p = 0.118 |
| < 4 (negative): 228 | Walk: 170 (74.6%) Other: 58 (25.4%) | |

Table 9. Parents' opinion about walking to school

4.6. Parents' opinion about walking to school

Table 9 shows the average response to the statements that address the beliefs and attitudes of parents regarding walking to school. The answer choices ranged from "Very unimportant" (1) to "Very important" (5). It was assumed the parents with answers equal or above 4 have a positive opinion about their children walking to school (Table 9).

The results in Table 9 reveal that parents' opinion about walking does not influence the mode their children use to access school (Chi-square test with $p > 0.05$, for the three statements).

4.7. Logistic Regression

Binary logistic models were calibrated to examine the likelihood of a child walking to school versus not walking (using other modes of transport). The variables were included if they showed significant association with the dependent variable and added significantly to the model estimation (Table 10 shows the final model).

The logit model results are summarized in Table 11. Odds ratios were calculated to determine the magnitude of the effect a variable had on predicting travel to school by walking.

| |
|---|
| <p>Dependent (binomial variable): MODE = 1(Walk), MODE = 2 (Other modes of transport)</p> <p>Independent variables for walk utility: <i>CAR</i> = 1 (an automobile is available at home), <i>CAR</i> = 0 (no automobile available) <i>D1</i> = 1 (Distance from home to school \leq 0.5 km), <i>D1</i> = 0 (Otherwise) <i>FAMILY</i> = 1 (approval by family \geq 4), 0 (otherwise) <i>FRIENDS</i> = 1(approval by friends \geq 4), 0 (otherwise) <i>HABIT</i> = 1 (parent's habit of walking \geq 4), 0 (otherwise) <i>HIGHSPEED</i> = 1 (no high speed vehicles), 0 (otherwise)</p> <p>Utility (other transport modes) = 0</p> |
|---|

Table 10. Binomial logit model variables

| Variable | Coefficient | SE | t-test | p | Odds ratio |
|----------|-------------|-------|--------|-------|------------|
| A1 | -0.183 | 0.249 | 0.74 | 0.253 | 0.83 |
| CAR | -1.320 | 0.199 | 6.63 | 0.000 | 0.27 |
| D1 | 0.601 | 0.278 | 3.08 | 0.000 | 1.82 |
| FAMILY | 0.857 | 0.172 | 5.39 | 0.000 | 2.35 |
| FRIENDS | 1.030 | 0.293 | 3.51 | 0.000 | 2.80 |
| HABIT | 0.460 | 0.192 | 2.40 | 0,020 | 1.58 |
| SPEED | 1.110 | 0.186 | 5.96 | 0.000 | 3.03 |

Number of observations: 782
Init log-likelihood: -542.041
Final log-likelihood: -373.537
Likelihood ratio test: 337.007
Rho-square: 0.311

Table 11. Binomial logit model results

In the final model, the only variable negatively related to walking was the availability of an automobile in the household (odds ratio = 0.27). Previous researches have also arrived to the same result (Sanches et al., 2009; Rosa, 2010).

The analysis highlights the influence that distance has on children walking to school. Living within a radius of less than 0.5km from school increases the odds of walking about 80%. This is consistent with the results of other studies (Schlossberg et al., 2006; McMillan, 2007; McDonald, 2007; Zwertsand and Wets, 2006; Christiansen et al., 2014) that distance is a significant reason for a declining rate of walking.

For a child whose family and friends approve walking to school, the odds of walking are more than two times larger than the odds of a child with no family or friends approval. The importance of social support from family and friends in stimulating walking to school was

shown in other studies as well (Aarts et al., 2013).

The results confirmed that parents' attitude toward physical activity (how often and regularly they walk) is related to the odds of a child walking to school (odds ratio = 1.58), a finding already known from other studies (Panter et al, 2010).

The odds of walking are three times larger if the parents consider the route to school to be safe (no speed vehicles). Previous researches (McMillan, 2007, Larsen et al., 2013, Rothman et al., 2015, Broberg and Sarjala, 2015) have also shown the negative association between the likelihood of walking and the perception of safety on the route to school.

5. CONCLUSIONS

This study analyzed the relationship between several factors and the odds of a child walking to school. The results showed that apart from characteristics of the household and parents (car availability, parents' attitude toward physical activity), also distance to be travelled, and social approval are related to walking to school among children in a Brazilian medium sized city.

In contrast to the general idea that age and gender influence the selection of the mode of transport, this study did not show a consistent relationship between these variables and walking to school. A possible explanation for this finding might be that other factors (like car availability) were so much more important that they hindered the effect of age and gender.

Although perception of social security (neighborhood security and worrying that the child might be harassed by strangers) was significantly associated with walking, this variable was not relevant in the final model (a rather counter intuitive finding that requires further study).

Finally, some limitations of this study have to be mentioned: (1) Neighborhood safety and security were evaluated based on parent's perception. Even though these aspects as perceived by parents are very important, the actual characteristics, assessed by means of audits, might be useful in future research; (2) Because the study was conducted in only one Brazilian medium-sized city, the findings might not be extended to other cities in other areas.

Acknowledgments

The findings presented in this paper are part of research funded by FAPESP (Fundação para Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo).

REFERENCES

- AARTS, M.; MATHIJSSSEN, J.; VAN OERS, J.; SCHUIT, A. (2013) Associations between environmental characteristics and active commuting to school among children: a cross-sectional study, *Int.J. Behav. Med.* 20, p. 538–555
- BROBERG, A.; SARJALA, S. (2015) School travel mode choice and the characteristics of the urban built environment: The case of Helsinki, Finland. *Transport Policy* 37, p. 1–10.
- CHRISTIANSEN, L.; TOFTAGER, M. ;CHCIPPERIJN, J.; ERSBOLL, A.; GILES-CORTI, B.; TROELSEN, J. (2014) School site walkability and active school transport – association, mediation and moderation. *Journal of Transport Geography* 34, p. 7-15
- COSTA, F.; SILVA, K.; SCHMOELZ, C.; CAMPOS, V.; ASSIS, M. (2012) Longitudinal and cross-sectional changes in active commuting to school among Brazilian school children, *Preventive Medicine* v.55, p. 212-214.
- DUARTE SILVA, G.; SANCHES, S. (2008) Avaliação do índice de massa corporal (IMC) de crianças de escolas municipais de São Carlos. SP. *Anais do 16º Congresso de Iniciação Científica da UFSCar*.
- GOEVERDEN, V.; BOER, E. (2010) School travel behaviour explained: a comparative study of the Netherlands and Flanders, *12th World Congress of Transport Research*, p. 11-15.
- KELLY, J.; FU, M. (2014) Sustainable school commuting – understanding choices and identifying opportunities - A case study in Dublin, Ireland, *Journal of Transport Geography* 34. p. 221–230
- LARSEN, K.; BULIUNG, R.; FAULKNER, G. (2013) Safety and school travel: How does the environment along the route relate to safety and mode choice? *TRB 2013 Annual Meeting*.
- MACKETT, R.; LUCAS, L.; PASKINS, J.; TURBIN, J. (2005) The therapeutic value of children's everyday travel. *Transportation Research Part A*, v.39. p. 205-219.
- McDONALD, N. (2007) Children's mode choice for the school trip: the role of distance and school location in walking to school, *Transportation*35(1), p. 23-35.
- McMILLAN, T. (2007) The relative influence of urban form on a child's travel mode to school. *Transportation Research Part A* 41, p. 69-79.
- PANTER, J.; JONES, A.; SLUIJS, E.; GRIFFIN, S. (2010) Neighborhood, Route and School Environments and Children's Active Commuting. *Am J PrevMed* 38(3), p. 268 –278
- ROSA, F. (2010) *Fatores que influenciam na opção de modo de transporte de crianças para a escola – estudo de caso São Carlos-SP*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos.
- ROTHMAN, L.; BULIUNG.; MACARTHUR, C.; MACPHERSON, A.; HOWARD, A. (2015) Associations between parents' perception of traffic danger, the built environment and walking to school, *Journal of Transport & Health* 2, p. 327–335
- SANCHES, S.; FERREIRA, M.; FARIA, C. (2009) Fatores que influenciam a opção de modo de transporte das crianças para a escola, *XV Congresso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano*.

- SCHLOSSBERG, M.; GREENE, J.; PHILLIPS, P.; JOHNSON, B.; PARKER, B. (2006) Effects of Urban Form and Distance on Travel Mode, *Journal of the American Planning Association*, v.72, n3, p. 337-346.
- SHENGXIAO, L.; PEGNJUN, Z. (2015) The determinants of commuting mode choice among school children in Beijing, *Journal of Transport Geography* 46, p. 112–121
- SILVA, K.; LOPES, A. (2008) Excesso de Peso. Pressão Arterial e Atividade Física no Deslocamento à Escola, *Arquivos Brasileiros de Cardiologia* 91(2), p. 93-101.
- VOVSHA, P.; PETERSEN, E. (2004) Escorting children to school: statistical analysis and applied modeling approach, *TRB 2004 Annual Meeting*.
- YARLAGADDA, A.; SRINIVASAN, S. (2008) Modeling children's school travel mode and parental escort decisions, *Transportation* 35, p.201–218
- ZWERTS, E.; WETS, G. (2006) Children's travel behavior: a world of difference, *TRB 2006 Annual Meeting*.

2 Assessment of the sustainable performance of urban-passenger transport using Probabilistic Composition of Preferences

Vanessa de Almeida Guimarães

Ilton Curty Leal Junior

Pauli Adriano de Almada Garcia

Fluminense Federal University (UFF), Brazil

ABSTRACT

Despite the international concern about sustainable development, the assessment of the transport system's performance usually considers only economic or environmental aspects. This paper aims to assess the sustainable performance of the transport alternatives for passengers in Rio de Janeiro – Niterói route. Therefore, documentary research was performed in order to analyze the sustainable indicators and the Probabilistic Composition of Preferences technique was applied to rank the alternatives. The findings show that, although recent governmental policies have focused in reducing some taxes for buying cars and also incentivizing the non-individual alternatives of transportation (e.g. buses, ferries), the alternative that has reached the best performance was the motorcycle (for all decision-makers profiles). Besides, the cars – either moved by gasoline (the most used option) or by ethanol – had the worst performance.

KEYWORDS: Performance assessment; urban-passenger transportation; sustainability; probabilistic composition of preferences

1. INTRODUCTION

Transport activities are essential for economic development since they promote jobs' creation and contribute to increase the gross domestic product - GDP (CNT, 2012). Nevertheless, they cause social and environmental impacts. The environmental impacts are mainly related to atmospheric pollution and greenhouse gas (GHG) emissions, noise, water and soil pollution and visual intrusion (Leal Jr and D'Agosto, 2011).

Regarding the social dimension, transport activities can contribute to the income distribution, improving the population's quality of life in urban and rural zones (Guimarães and Leal Jr., 2016). Then, they directly impact on land use, accessibility, mobility, security and equity (Santos and Ribeiro, 2013; Smith, et al. 2013; Alonso et al., 2014). Whether the impact is positive or negative, it depends on the governmental planning. Therefore, the performance assessment of a transport system should consider economic, environmental and social

dimensions (meaning sustainability assessment as United Nation) (Guimarães and Leal Jr., 2016).

Besides, the intensity of the flow of people in urban centers depends on the dispersion of the daily activities (e.g. work, study and leisure) (Alonso et al., 2014), which directly impacts on transportation demand (ANTP, 1997). Considering that 92% of the movements are concentrated on road modes (MME, 2012) it intensifies the social and environmental problems. Thus, assuming the possibility of modal choice, we ask, what is the performance of the urban-passenger transport alternatives, when considering the sustainability concept?

This paper aims to assess the sustainable performance of the alternatives for passengers' transportation on the Niterói route in Rio de Janeiro -. Therefore, the multi-criteria technique known as Probabilistic Composition of Preferences – PCP was applied in order to rank the alternatives available on this route, according to their sustainable performance. As secondary goal, we aim to propose a set of indicators to evaluate the performance of transport alternatives for passengers, considering the sustainability concept.

This route was selected due to its relevance in the metropolitan region of Rio de Janeiro (PDTU, 2013) and to the availability of different transport alternatives. Regarding the technique, PCP is a method to consider multiple criteria that takes into account the uncertainties in preference evaluations (Sant'Ana, 2013). By considering the uncertainties in the model specification, the PCP model reflects reality better.

We emphasize that neither all indicators for each aspect of sustainability, nor the complete networks were considered (we evaluated specific and pre-established origins and destinations). From this introduction, this paper is structured into four sections: (1) sustainable performance in passenger transport; (2) methodological procedures; (3) discussion of the findings; and (4) final considerations.

2. SUSTAINABLE PERFORMANCE IN PASSENGER TRANSPORT

Performance assessment in transport is defined as a set of procedures that allow to analyze with reasonable certainty whether the movement demands (of people or goods) are according to the predefined criteria, aiming to propose improvements to the system under assessment (Leal Jr. and D'Agosto, 2011; Guimarães and Leal Jr., 2016).

Therefore, in order to achieve a sustainable performance, the planning of the transportation system should take into consideration human and ecosystems' health, aiming to offer accessibility, mobility and equity to population, besides being efficient (Figuroa and Ribeiro, 2013; Litman and Burell, 2006). It implies finding the balance (current and future) between the economic, environmental and social aspects (Steg and Gifforf, 2005) as proposed in Brutland reports (United Nation and Litman, 2016).

According to Alonso et al. (2014), the transport system can be considered sustainable if:

“It is affordable; operates fairly and efficiently; offers alternatives for modal choice; and supports a competitive economy, as well as a balanced regional development” (ECONOMIC DIMENSION);

“The needs of individuals, companies and societies are met safely and consistent with human and ecosystem health, and promises equity within and between successive generations” (SOCIAL DIMENSION);

“It limits the emissions and waste within the planet’s ability to absorb them; uses non-renewable resources at (or below) the rates of development of renewable substitutes while minimizing the impact on land and the generation of noise” (ENVIRONMENTAL DIMENSION).

Nevertheless, there is not a clear and consensual definition about the sustainability aspects in passenger transport (Holden et al., 2011). Thus, it becomes relevant to propose a set of indicators that could be applied to assess its sustainable performance (Castillo and Pitfield, 2010; Shen et al., 2011; Toth-Szabo and Varhelyi, 2012; Santos and Ribeiro, 2013; Shiau and Liu, 2013; Smith et al., 2013; Alonso et al., 2014).

Guimarães et al. (2014) highlight that the performance assessment structure is diversified, regardless the standpoint and the bias of analysis. Therefore, we adopted the structure proposed by Leal Jr. and D'Agosto (2011), presented in Table 1. The elements are interdependent and those in the higher levels guide the others, e.g. "categories" guide “aspects” and both of them influence the “attributes”.

It is important to highlight that the performance assessment of the transport sector usually considers only two aspects: (1) financial-economic that includes issues that interfere the monetary outcome; and (2) environmental that considers the environmental impacts of the activity (even those that do not influence the costs, directly) (Leal Jr and D'Agosto, 2011). It is accordingly to the findings of Markovich and Lukas (2011) that the social aspect tends to be less considered than the environmental and economic ones. It reinforces the relevance of this paper.

Therefore, Table 2 presents a set of indicators to assess the sustainability performance of passenger transport, based on: Greene and Weneger (1997), Kennedy (2002), Richardson (2005), Litman and Burell (2006), May et al. (2008), Castillo and Pitfield (2010), Awasthi and Chauhan (2011), Awasthi et al. (2011), Markovick and Lukas (2011), Shen et al. (2011), Loo and Li (2012), Shiau (2012), Figueroa and Ribeiro (2013), Gandhi et al. (2013), Goldman and Gohan (2006), Holden et al. (2011), Moriarty and Honnery (2013), Santos and Ribeiro (2013), Shiau and Liu (2013), Smith et al., (2013), Alonso et al. (2014), Guimarães

and Leal Jr (2014), Guimarães and Leal Jr (2016). The indicators proposed by Leal Jr and D'Agosto (2011), Leal Jr and Guimarães (2013), Lemos et al. (2014) and Guimarães et al. (2015) to assess the freight transportation were also considered, since they might be adopted to the passenger transport.

Table 1. Variables used in transport performance assessment

| Element | Description | Examples |
|------------|--|---|
| Categories | They determine the focus of the assessment, which is considered to define the other variables. | Efficacy, efficiency, effectiveness, eco-efficiency, sustainability |
| Aspects | They drive the evaluation's perspective. | Economic, environmental, social |
| Attributes | Features associated with some element (network, modes of transportation, type of operation). They are related to the aspects and creation of indicators. | Costs, service level, atmospheric pollution, energy consumption |
| Indicators | They represent the attributes, preferably quantitatively. | Amount of freight moved, operational costs, net revenue |
| Measures | Combination of indicators related to the attributes, and also representing aspects and categories. | Operational costs / amount of freight moved |

Source: Guimarães and Leal Jr., 2016

Table 2. Indicators for the sustainability assessment in passenger transport

| Aspects | Attributes | Indicators | Unit |
|---------------|--------------------|---|-----------------|
| Economic | Monetary value | Associated to the amount of passengers transported | \$ ¹ |
| | | Total costs with passenger transportation (operators' standpoint) | \$ ¹ |
| | | Total cost of travel (user perspective) | \$ ¹ |
| | | Costs related to car traffic | \$ ¹ |
| | Produced service | Amount of passengers transported | qty |
| Environmental | GHG emissions | CO ₂ emission | t |
| | | CH ₄ emission | t |
| | | N ₂ O emission | t |
| | | CFC emission | t |
| | | Water vapor emission | t |
| | Pollutant emission | Hydrocarbons emission | t |
| | | Aldehydes emission | t |
| | | CO emission | t |

| Aspects | Attributes | Indicators | Unit |
|---|--------------------------|---|-------------------------|
| | | Acidifying gases (SO _x , NO _x) emission | t |
| | | Particulates material emission | t |
| | Energy consumption | Total energy consumption | MJ |
| | | Total of renewable energy consumed ² | MJ |
| | Noise pollution | Total intensity of noise emitted by passenger vehicles | Db |
| | Water and soil pollution | Amount of waste from operation | t |
| | | Amount of oil discharged by the vehicles | l |
| | Social | Mobility | Total number of travels |
| Number of travels done by elders ³ | | | qty |
| Number of travels done by people with disabilities ³ | | | qty |
| Number of travels done by people with low income | | | qty |
| Safety | | Total number of accidents | qty |
| | | Total number of accidents with deaths | qty |
| | | Total number of accidents with severe injuries | qty |
| | | Total costs of accidents ⁴ | \$ ¹ |
| | | Total number of robberies and other crimes suffered during the route | qty |
| Accessibility | | Traveled distance | km |
| | | Number of residences with public transport services within a distance of 500m | qty |
| Motorization | | Number of cars | qty |
| | | Number of habitants of an specific region | qty |
| | | Number of non-motorized travels | qty |
| | | Number of motorized travels | qty |
| Speed | | Total time of travel | h |
| | | Total time of displacement to the nearest terminal of public transportation | h |
| | | Waiting time at the terminals | h |
| | | Time stopped in traffic jams | h |

Notes: (1) Monetary value (in R\$, US\$, £ and so on). (2) In Brazil, electric energy is considered a renewable source because it comes, majority, from hydroelectric power stations. (3) In each transport mode. (4) It is considered as a social indicator because the costs related to accidents can represent how severe they are.

We noted that there is such conceptual confusion in the studied papers about categories, aspects, attributes, indicators and measures. According to Leal Jr and D'Agosto (2011), for instance, "safety" would be an attribute but it was considered an indicator in Santos and Ribeiro (2013), Awasthi and Chauhan (2011), Awasthi et al. (2011) and Shiau (2012).

Besides, we have not found unanimity among authors about the more appropriated indicators to each aspect. Santos and Ribeiro (2013) and Alonso et al. (2014) consider the “travel’s total time” as an economic indicator because they assume that this “wasting time” could be applied to productive activities. Nevertheless, Kennedy (2002) considers it as a social indicator since it is associated to service level. Thus, the application presented in Section 4 of this paper, considers the structure proposed in Table 2.

3. METHODOLOGICAL PROCEDURES

Literature and documentary researches were carried out, according to Silva and Menezes (2001), with the aim of understanding how the performance assessment is carried out in the transport sector and, especially what variables (from categories to measures) are usually applied. From this survey, we propose the indicators of Table 2.

From the set of proposed indicators, we have selected three (one for each aspect) to execute the analysis described, the main objective of this paper. We have chosen "total travel time" as a social indicator, "total travel costs" as an economic indicator and "total energy consumption" as an environmental indicator. This selection was based on the data availability to evaluate the performance on the selected route. Those data were gathered from secondary sources, mainly, from: PDTU (2013), Hossmann et al. (2013), Guimarães et al. (2014), and Silva et al. (2014). In order to calculate the indicators, applied Equations 1 – 3.

$$\text{Economic} \quad CT = \frac{\left(\frac{D_t}{R} Pr\right) + Pe + d}{T_x} \quad (1)$$

$$\text{Social} \quad T = \frac{D_t}{Vm} + tc + te + tt \quad (2)$$

$$\text{Environmental} \quad CET = ce T_x D_t \quad (3)$$

Where:

CT = total cost [R\$/passenger/travel]; D_t = distance between origin and destination areas [km]; R = average vehicle autonomy [km/l]; Pr = fuel price [R\$]; Pe = toll price [R\$]; d : daily depreciation [R\$]; T_x : occupancy rate [quantity]; T = travel total time [hour/passenger/travel]; Vm = average speed [km/h]; tc = walking total time [hours]; te = waiting total time at terminals [hours]; tt = time of boarding and getting off [hours]; CET = total consumption of energy in the route [MJ/passenger/travel]; and, ce = energy consumption [MJ/passenger/km].

We highlight that we have considered the tariffs found in the websites of the transport companies, for the collective modes, as “total cost of travel”. We have not taken into account

the possibility of multiple-round ticket usage for ferries; though, due to the difference in the existing tariffs, we have assumed it as the tariff for buses.

Daily depreciation (d), in Equation 1, was calculated based on the daily depreciation rate (which considers the travel total time per day) and the useful life of a vehicle - as presented in Equation 4.

$$d = i V \quad (4)$$

Where:

d = daily depreciation [R\$]; i = daily depreciation rate for the selected vehicle [%];

V = average value of a popular vehicle (car or motorcycle) [R\$]

In order to assess the performance of the passenger transport alternatives in the route Rio – Niterói, we have applied a multi-criteria method known as Probabilistic Composition of Preferences – PCP. This route was selected due to its importance in the metropolitan region of Rio de Janeiro (PDTU, 2013) and because it offers diverse transport alternatives. The technique was chosen because it considers uncertainties on the preferences or on attributes (Garcia et al, 2013; Sant’Ana, 2013).

According to Roy (1985), multi-criteria support to decisions is an attempt to provide answers, through a clearly specified model, to the questions raised by the entities involved in the decision- making process. When considering the uncertainties in the model specification, the PCP model more precisely reflects reality.

In PCP, the composing of preferences is the result of the classification of the alternatives (or options), according to each criterion involved in the analysis, which are measured as probabilities. After assessing the preferences based on each criterion (probabilities), we can evaluate the overall preference by jointly comparing the probabilities (Sant’Anna, et al., 2011). This technique has two stages: (1) defining the probability of an alternative being the best or worst one; and (2) establishing the composition of the probabilistic preferences.

In the first one, it is possible to establish an order of priority by means of determining the preferences, depending on the type of criterion – the higher, the better; the smaller, the better; or the closer to some chosen value, the better. After determining the ranking of the options, based on each criterion, the next step is to calculate the probability of that option to be the best one, according to each criterion, individually.

The preferred probability of an alternative – according to each criterion - is defined by the probability that it is better than any other alternative under evaluation. Therefore, the calculation of the probability of preference consists in calculating the probability to an fix i (that corresponds to the alternative under analysis) of the intersection of n events [in the random vector (X_1, X_2, \dots, X_n) , $X_i \geq X_j$] get from j varying from 1 to n (Sant’Ana, 2013).

According to Sant’Anna (2013), this probabilistic transformation is the key for the

composition of the preferences under uncertainty. Then, the relative position obtained in the preceding step is, for each option, a measure of the location of the probability distribution of the preference, according to the criteria under analysis. Simple distributions are considered preferentially, such as the uniform, triangular or normal. This paper considered a triangular distribution.

The probability that an option is the best, according to each criterion, is computed by the integral of the joint density function of the option under analysis, considering an interval for which this option is the best among all options - according Equation 5.

$$M_{ik} = \int_{L_{ik}}^{U_{ik}} \left[\prod_{j=1}^n \int_{L_{jk}}^{X_{ik}} f_{X_{jk}}(x') dx' \right] f_{X_{ik}}(x) dx \quad (5)$$

Where:

L_{ik} and U_{ik} are, respectively, the lower and upper bounds of the domain of a random variable; X_{ik} represents the preference for option k according to criterion i ; n is the number of options being analyzed and is the probability density function. The product sequence inside the brackets is the product of the probabilities that the variables are lower than X_{ik} , ($X_k < X_{ik}$), for all the other options involved in the analysis.

Another probability measure is the minimum one, which represents the probability of being the last preferable alternative under criterion i - according Equation 6.

$$m_{ik} = \int_{L_{ik}}^{U_{ik}} \left[\prod_{j=1}^n \int_{X_{ik}}^{U_{jk}} f_{X_{jk}}(x') dx' \right] f_{X_{ik}}(x) dx \quad (6)$$

Notice that, in both equations, the product considers the implicit hypothesis of independence of the disturbances in the evaluations of different options. Note that X_{ik} is compared to the distributions of the other positions, X_{jk} . After making this comparison for each possible value of X_i , since it is considered as a random variable, the next step is to calculate the expected value of this product sequence, according to the distribution of X_i . This calculation must be performed for each option in each criterion. Therefore, M_{ik} is the probability that option k is the best one according to criterion i , and m_{ik} is the probability that option k is the worst one, according to the same criterion i .

Having calculated the values of the options' probabilities according to each criterion, the next step is to combine the probabilistic preferences to generate an overall probabilistic preference (Stage 2). A general average preference of the probabilities can be calculated considering the different profiles of the decision-maker, which can be: (1) optimistic – the decision-maker is satisfied if, at least in one of the criteria, the chosen alternative is the best (“or” criteria); (2) pessimist – selects only the alternatives that reach the best value in all evaluated criteria (“and” criteria); (3) progressive – it selects the best alternatives, since it

aims the excellence; and (4) conservative – risk-averse, he selects only the alternatives that do not minimize the preference. By blending the presented profiles, we can create other profiles as presented in Equations 7 – 10.

$$\text{Optimistic-conservative} \quad OC_j = 1 - \prod_{i=1}^c m_{ik} \quad (7)$$

$$\text{Optimistic-progressive} \quad OP_j = 1 - \prod_{i=1}^c (1 - M_{ik}) \quad (8)$$

$$\text{Pessimist-conservative} \quad PC_j = \prod_{i=1}^c (1 - m_{ik}) \quad (9)$$

$$\text{Pessimist-progressive} \quad PP_j = \prod_{i=1}^c M_{ik} \quad (10)$$

For all the presented profiles, the sequence varies in i , over the criteria under analysis. We highlight that the described probabilities are based on the premise of criteria's independence. For dependent events, we recommend the analysis of Sant'Anna (2013).

4. DISCUSSION OF THE FINDINGS

In order to assess the performance, we selected the route between the Rio de Janeiro city and Niteroi city (center to center analysis). Daily, 232,000 people transit on this route (Silva et al, 2014); most of them for work, leisure or study reasons, by road and waterway (PDTU, 2013); 34% of them cross the route by ferries. The parameters of the assessment are presented in Table 3.

From these parameters, we have evaluated the five available alternatives in the selected route, whose features are described in Table 4. In order to estimate the indicators described in Section 3, we applied the Equations 1 – 4, considering the data gathered from PDTU (2013), Hossmann et al. (2013), Guimarães et al. (2014), Silva et al. (2014) and CCR (2015).

From the indicators of Table 5, the alternatives were preliminarily ranked in order to apply PCP. Each alternative in each criterion assumed a value from 1 to 5, according to its performance, with “5” being the best value. For instance, since it is desirable that the total travel cost be as low as possible, alternative A5 assumed a value equal to 5, A4 equal to 4 and so on, following this logic for all the criteria.

Equations 5 and 6 were applied to the gathered data, considering a triangular probability distribution, to obtain M_{ik} (probability of being the best alternative in each criterion) and m_{ik} (probability of being the worst alternative in each criterion) for each alternative in each

criterion. The results are presented in Table 6.

Combining these two types of probabilities, we found the results for the four decision-maker profiles: OC, OP, PC e PP - applying Equations 7, 8, 9 and 10, which are presented in Figure 1.

Analyzing Figure 1, we can note that motorcycle is the alternative with best performance, for all the decision-maker profiles, followed by the ferry, the bus, the car by ethanol and the car by gasoline. Only in the optimistic-progressive profile, there is difference in the ranking: bus overcomes the ferry in 0.006 percentage points. It means that the performance of these alternatives is almost the same, in this scenario.

Table 3. Parameter of the assessment proposed in this paper

| Parameters | Description |
|-------------------------------|--|
| Passengers and their features | Those who travel to work, leisure and/or study |
| Network and transport modes | Network and alternatives presented in Table 4 |
| Category of assessment | Sustainability |
| Aspects | Economic, social and environmental |
| Point of view | Governmental |
| Analysis level | Strategic |
| Scope | Part of the transport system |

Table 4. Description of the transport alternatives under assessment

| Mode ¹ | Type | Alternative | Fuel | Capacity [pass/vehicle] | Average occupancy rate |
|-------------------|------------|-------------|-------------|-------------------------|------------------------|
| Road | Individual | Flex car | Gasoline | 5 | 30% |
| | | Flex car | Ethanol | 5 | 30% |
| | | Motorcycle | Gasoline | 2 | 50% |
| | Collective | Stretch bus | Diesel (B5) | 83 | 96% |
| Waterway | Collective | Ferry | Diesel | 2000 | 28% |

Note: (1) By road modes: 20,7 km from Alfredo Agache Terminal (RJ) to João Goulart Terminal; By ferry, 5 km from Praça XV (RJ) to Praça Araribóia (Niterói)

Source: PDTU

Table 5. Indicators used in the performance assessment

| Alternatives | | Aspects | | |
|--------------|----------------|---|---|--|
| | | Economic | Social | Environmental |
| | | Total cost of travel [R\$/pass/travel] | Total time of travel [h/pass/travel] | Total energy consumption [MJ/pass/travel] |
| A1 | Car (gasoline) | 9.68 | 1.04 | 39.7900 |
| A2 | Car (ethanol) | 8.53 | 1.04 | 41.4000 |
| A3 | Bus | 5.90 | 1.88 | 3.8662 |
| A4 | Ferry | 5.00 | 0.83 | 8.6519 |
| A5 | Motorcycle | 4.80 | 0.52 | 17.9055 |

Notes: (1) We considered the car's autonomy as 10 km/l and the motorcycle's one as 40 km/l; (2) In order to calculate the depreciation, we assumed a month of 30 days (with 8 useful hours/day), considering that the useful life of a vehicle is 5 years. Thus, we applied a depreciation rate of 20% per year (RFB, 2014), to the average financial value of a popular car, estimated in R\$ 29,331.00, and of a popular motorcycle, in R\$5,500.00 (FIPE, 2015). (3) We assumed that the time spent walking, boarding, landing and waiting (for collective vehicles) was equal to 30 minutes (or 0.5 hours). It was considered non-existent for the individual alternatives. (4) Regarding the average speed, we assumed 20km/h for car, 40km/h for motorcycle and 15km/h for bus and ferry, values that already include eventual times due to traffic jams and stops on the route.

Table 6. M_{ik} and m_{ik} of each alternative

| Alternatives | Maximum preference probabilities (M_{ik}) | | | Minimum preference probabilities (m_{ik}) | | |
|--------------|---|--------|--------|---|--------|--------|
| | A1 | 0,0740 | 0,0840 | 0,0980 | 0,4320 | 0,3520 |
| A2 | 0,0980 | 0,0840 | 0,0740 | 0,2500 | 0,3520 | 0,4318 |
| A3 | 0,1465 | 0,1265 | 0,4318 | 0,1465 | 0,1569 | 0,0735 |
| A4 | 0,2502 | 0,2366 | 0,2502 | 0,0980 | 0,0837 | 0,0980 |
| A5 | 0,4318 | 0,4696 | 0,1465 | 0,0735 | 0,0561 | 0,1465 |

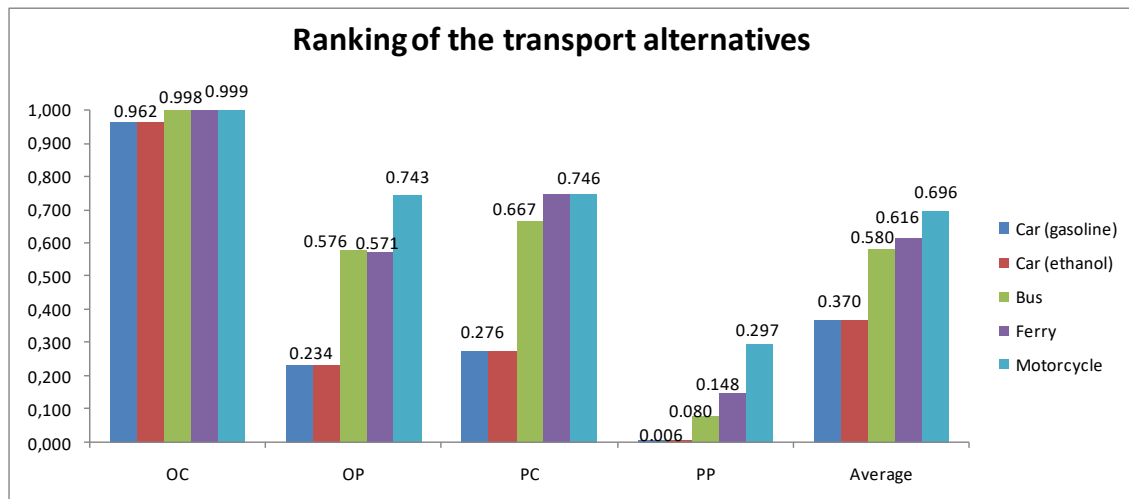


Figure 1. Ranking of the transport alternatives for each decision-maker profile

Note: The results of PP profile were increased tenfold in order to appear in the graphic, allowing the comparison.

It is also possible to note that, in the optimistic-conservative profile, the motorcycle, ferry and bus' performances are very similar, being above 99.8%. Cars (gasoline and ethanol) have a performance a slightly lower (96.2% for both), but all the alternatives accumulate a probability greater than 95%. In the pessimist-conservative profile, motorcycle and ferry have a similar performance; the difference reaches only two percentage points. Later, the bus and both types of cars appear.

From the sustainability standpoint, the profile closest to the concept proposed is the pessimist-progressive, since it considers the probability that this alternative is the best in all the criteria. Thus, from the sustainable point of view, motorcycle would have the best result, followed by ferry and bus. The cars (ethanol and gasoline) are tied last.

For an average profile of decision-maker, considering the average between the four profiles, the rank would have motorcycle in the first place (0.697), followed by ferry (0.616), bus (0.58) and cars (both of them with 0.3696). Therefore, we note that the car, the most used alternative in this route, has the worst performance, regardless of the decision-maker profile. Besides, collective transport alternatives with higher capacity do not have the best performance in any of the scenarios.

It is important to mention that, the findings may be related to the fact that only three indicators were select and, they were chosen arbitrarily, considering only the data availability. Nevertheless, improving the sustainable performance requires actions in social, economic and environmental aspects. Focusing in just one of them may improve the performance of some profiles (such as optimistic or optimistic-conservative) but does not imply a sustainable improvement, since it requires a greater performance in all aspects. Then, an upgrading of the pessimistic-progressive profile should be pursued.

5. FINAL CONSIDERATIONS

Although the sustainability concept has been discussed at relevant international conferences and the sustainable mobility has been remarkable in the transport sector, this paper showed that there is not a consensual framework about how this sector should be evaluated considering the sustainability concept.

Thereby, based on documentary research, we proposed a set of indicators that allow us to assess the sustainable performance of transport alternatives for passengers. Besides, we also aimed to minimize the conceptual confusion found in literature about categories, aspects, attributes, indicators and measures. Therefore, we presented and applied the conceptual framework proposed by Leal Jr and D'Agosto (2011).

Among the proposed indicators, we have selected three (one for each aspect of sustainability) in order to analyze the Rio-Niteroi route, from sustainable standpoint. By applying PCP, we have found that, despite the recent governmental policies (e.g. incentive the collective alternatives by the Sustainable Mobility Law or the tax reduction for buying cars), the alternative with the best performance is the motorcycle. Besides, the most used alternative (car by gasoline) has the worst performance for all decision-makers profiles.

Nevertheless, even the better performance alternatives still have potential to improve. We assume that the low occupancy rate of cars and ferry (compared to the other alternatives) may have influenced their performance. Therefore, it should be researched in future studies. If this assumption is correct, it would be necessary to indicate actions to improve their occupancy rate, without compromising the service level.

We highlight that a greater occupancy rate would have a positive reflect on the transport system, since fewer vehicles would transport the same number of passengers, which would influence the environmental and social indicators positively (analyzed in this paper). Besides, safety might be a relevant social indicator to be considered in further analysis, since it is one of the concerns of sustainable cities.

Moreover, properly identifying the profile of the decision-maker may be essential to lead the public policies (such as the choice to prioritize investments in ferry or bus systems). It would require the use of more indicators to analyze each attribute. The choice of these indicators could be based on expert research or literature study.

Some limitations of this paper are the following: the lack of a consensus in the literature regarding the indicators that belong to each aspect (depending on the approach, the same indicator is related either to economic or social aspects, for example); the fact that only three indicators were used to assess sustainable performance; and the application of secondary data.

As suggestions for further studies, we propose that: other dimensions could be included in the analysis (e.g. political); the application of a set of indicators for each sustainability aspect (instead of one for each, as done in this paper); the selection of different routes with similar features, to be compared; the selection of routes with other transport alternatives (including the non-motorized ones, as bicycles); the variables that compose each indicator could be simulated (considering that they do not have a linear behavior); and another multi-criteria techniques and/or simulation could be conjoined in the analysis.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was published with CNPq support, National Council for Scientific and Technological Development- Brazil (Research Productivity Fellowship Holder - CNPq Brazil Process 308729/2014-5).

REFERENCES

- ALONSO, A.; MOZÓN, A. and CASCAJO, R. (2014). *Comparative analysis of passenger transport sustainability in European cities*. *Ecological Indicators* 48, pp.78–592.
- ANTP (1997). *Human Transportation: Cities with quality of life*. São Paulo [in Portuguese].
- AWASTI, A. and CHAUHAN, S. S. (2011). *Using AHP and DempstereShafer theory for evaluating sustainable transport solutions*. *Environmental Modelling & Software* 26, pp. 787- 796.
- AWASTI, A.; CHAUHAN, S. S. and OMRANI, H. (2011). *Application of fuzzy TOPSIS in evaluating sustainable transportation systems*. *Expert Systems with Applications* 38, pp. 12270–12280.
- CASTILLO, H and PITFIELD, D. E. (2010). *ELASTIC – A methodological framework for identifying and selecting sustainable transport indicators*. *Transportation Research Part D* 15, pp.179–188.
- CCR (2015). *CCR Ferries*. Available at: <<http://www.grupoccr.com.br/barcas>>. Access: apr/2015. [In Portuguese]
- CNT (2012). *The importance of transportation sector*. Brasília. [in Portuguese]
- FIGUEROA, M. J. and RIBEIRO, S. K. (2013). *Energy for road passenger transport and sustainable development: assessing policies and goals interactions*. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 5, pp.152–162.
- FIPE (2015). *Average price of vehicles – FIPE Table*. Available at: <<http://www2.fipec.org.br/pt-br/indices/veiculos/>>. Access: apr/2015. [in Portuguese]
- GANDHI, S.; TIWARI, G. and FAZIO, J. (2013). *Comparative Evaluation of Alternate Bus Rapid Transit System (BRTS) Planning, Operation and Design Options*. *Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies* 10, pp.1292-1310.
- GARCIA, P. A. A.; OLIVEIRA, M. A.; LEAL Jr., I. C.; MOTTA, G. S. and MELO, P. F. F. (2013). *Probabilistic preferences composition for failure mode prioritization in FMEA*. ESREL, Amsterdam.

- GOLDMAN, T. and GOHAM, R. (2006). *Sustainable urban transport: Four innovative directions*. *Technology in Society* 28, pp.261–273.
- GREENE, D. L. and WEGENER, M. (1997). *Sustainable transport*. *Journal of Transport Geography* 5(3), pp. 177-190.
- GUIMARÃES, V. A. and LEAL Jr, I. C. (2016). *Performance assessment and evaluation method for passenger transportation: a step toward sustainability*. *Journal of Cleaner Production* [in press].
- GUIMARÃES, V. A. and LEAL Jr, I. C. (2014). *Eco-efficiency performance assessment of transport modes for passengers emphasizing the ferry transportation*. XVIII CLATPU, Rosario [in Portuguese].
- GUIMARÃES, V. A.; LEAL Jr, I. C. and GONZAGA, M. J. V. (2015). *Set of indicators for sustainability performance assessment in ports*. *European Transport Conf.*, Frankfurt.
- GUIMARÃES, V. A., LEAL Jr, I. C., SALES, J. P., ABADE, J. C. and FERNANDES, F. (2014). *Eco-efficiency analyses of urban transportation alternatives for passengers, emphasizing waterway modes*. XVIII ANPET, Curitiba. [in Portuguese].
- HOLDEN, E.; LINNERRUD, K. and BANISTER, D. (2011). *Sustainable passenger transport: Back to Brundtland*. *Transportation Research Part A*, v.54, pp.67–77.
- HOSSMANN, M. H. S.; ZARY, B. C. S.; SILVA, M. A. V. and SILVA, B. A. E. (2013). *Analysis of the passenger alternatives of transport regarding costs and time of travel*. *Congresso de Administração, Sociedade e Inovação, Itatiaia*. [in Portuguese].
- KENNEDY, C. A. (2002). *A comparison of the sustainability of public and private transportation systems: Study of the Greater Toronto Area*. *Transportation* 29, pp. 459-493.
- LEAL Jr, I.C. and D'AGOSTO, M.A. (2011). *Modal choice for transportation of hazardous materials: the case of land modes of transport of bio-ethanol in Brazil*. *Journal of Cleaner Production* 19, pp.229-240.
- LEAL Jr, I. C. and GUIMARÃES, V. A. (2013). *Eco-efficiency analysis of the operation in port terminals applying the multi-criteria decision aid tool*. *Revista Transportes* 21, pp.40-47. [in Portuguese].
- LEMOES, V. C. L.; GUIMARÃES, V. A. and LEAL Jr, I. C. (2014). *Aspects for studies of social impacts in ports*. XVIII ANPET, Curitiba. [in Portuguese].
- LITMAN, T. (2016) *Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning*. *Victoria Transport Policy Institute*. Available at: <<http://www.vtpi.org/wellmeas.pdf>>. Accessed in: May/2016.
- LITMAN, T. and BURWELL, D. (2006). *Issues in sustainable transportation*. *Int. J. Global Environmental Issues* 6(4), pp.331-347.
- LOO, B. P. Y. and LI, L. (2012). *Carbon dioxide emissions from passenger transport in China since 1949: Implications for developing sustainable transport*. *Energy Policy* 50, pp.464–476.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. MME. (2012). *Studies related to decennial plan of energy*. PDE 2021. Brasília. [in Portuguese].
- MARKOVICH, J. and LUKAS, K. (2011). *The Social and Distributional Impacts of Transport: A Literature Review*. *Transport Studies Unit*, Oxford.

- MAY, A. D.; PAGE, M. and HULL, A. (2008). *Developing a set of decision-support tools for sustainable urban transport in the UK*. *Transport Policy* 15, pp.328–340.
- MORIARTY, P. and HONNERY, D. (2013). *Greening passenger transport: a review*. *Journal of Cleaner Production* 54, pp.14-22.
- PDTU (2013). *Director Plan for Urban Transport of Metropolitan Area of Rio de Janeiro*. Report, Rio de Janeiro. [in Portuguese].
- RICHARDSON, B. C. (2005). *Sustainable transport: analysis frameworks*. *Journal of Transport Geography* 13, pp. 29–39.
- RECEITA FEDERAL DO BRASIL. RFB. (2014). Available at: <<http://www.receita.fazenda.gov.br>>. Accessed: Apr/2014.
- ROY, B. (1985). *Ranking and choice in the presence of multiple points of view (the Electra Method)*. *Revue Française d'Automatique Information et Recherche Operationelle* v.8, pp.57-75. [in French].
- SANT'ANNA, A. P. (2013). *Procedure to calculate the probabilistic composition of preference*. Research report in *Production Engineering* 13(1), pp.1-11. [in Portuguese].
- SANT'ANNA, A. P.; NOGUEIRA, H. D. and RABELO, L. M. (2011). *Comparision of multi- criteria methods in a model for quality evaluation of variable income assets*. *Revista de Finanças Aplicadas*, pp.1-21. [in Portuguese].
- SANTOS, A. S. and RIBEIRO, S. K. (2013). *The use of sustainability indicators in urban passenger transport during the decision-making process: the case of Rio de Janeiro, Brazil*. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 5, pp.251–260.
- SHEN, L-Y; OCHOA, J. J.; SHAH, M. N. and ZHANH, X. (2011). *The application of urban sustainability indicators: A comparison between various practices*. *Habitat International* 35, pp.17-29.
- SHIAU, T-A. and LIU, J-S. (2013). *Developing an indicator system for local governments to evaluate transport sustainability strategies*. *Ecological Indicators* 34, pp.361– 371.
- SHIAU, T-A. (2012). *Evaluating sustainable transport strategies with incomplete information for Taipei City*. *Transportation Research Part D*, 17, pp.427–432.
- SILVA, E. L. and MENEZES, E. M. (2001). *Research methodology and master thesis elaboration*. 3a ed. rev. Atual. Florianópolis: UFSC. [in Portuguese].
- SILVA, S. S; LEAL Jr., I. C.; GUIMARÃES, V. A. and GARCIA, P. A. A. (2014). *Modal Choice Method to passenger transportation based on eco-efficiency measures*. XI Congreso de Ingeniería de Transporte, Santander.
- SMITH, T.W.; AXON, J. C. and DARTON, R. C. (2013). *A methodology for measuring the sustainability of car transport systems*. *Transport Policy* 30, pp.308–317.
- STEG, L. and GIFFORD, R. (2005). *Sustainable transportation and quality of life*. *Journal of Transport Geography* 13, pp.59–69.
- TOTH-SZABO, Z. and VARHELYI, A. (2012). *Indicator framework for measuring sustainability of transport in the cities*. *Procedia Social and Behavioral Science* 48.

3 Demand adjustment for the transit network of Mexico City and its surroundings

María Victoria Chávez Hernández

Lorenzo Héctor Juárez Valencia

Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa, México

ABSTRACT

Estimating or adjusting an origin-destination demand matrix from previously known data is an important, some times critical, issue for public transportation systems. In this paper we employ a multiplicative conjugate gradient algorithm to estimate the origin destination matrix, based on observed volumes on a given set of segments. We show that this algorithm improves the performance of the traditional multiplicative steepest descent algorithm, introduced by Spiess in 1990. The proposed algorithm is programmed in the macro language of EMME/4 and is tested in a synthetic scenario for the transit network based on Mexico City (1705 zones).

Keywords: O-D matrix, bi-level programming, transit network, conjugate gradient.

1. INTRODUCTION

During the last five decades researchers have made a significant progress on the development of methods for recovering an origin-destination matrix (O-D matrix) from observed data in transportation networks. Most of those methods are designed for the study of traffic networks and only a relative small number of them are developed for public transportation systems. In the literature such methods are classified into two big groups (Bera and Rao, 2011): static and dynamic. For static methods the volumes (of vehicles or travelers) do not depend of time and the models are thought for long-term planning. For dynamic models the volumes are time-dependent and the methods are designed to control the flow of vehicles over the network or to suggest routes to travelers.

In general, computing an O-D matrix from observed link volumes gives rise to a problem with more unknown variables than independent constraints, and the solution is not unique. Then, some models look for the closest O-D matrix to a given obsolete one, under some assumptions, such as the structure of the matrix or trip information for some O-D zones. See, for instance, references Van Zuylen and Willumsen (1980), Spiess (1987), Spiess (1990), Bierlaire (1995), Codina et al. (2006), Lundgren and Peterson (2008), Noriega and Florian (2009). The most popular approaches formulate the problem as a convex optimization one, where the objective function corresponds to a regression model. Constraints are used to force the matching between the assigned volumes and the observed ones. These problems

can be reformulated as least squares models where the volume constraints are relaxed and incorporated into additional terms in the objective function. Least squares models have been studied and extended over the years (Cascetta, 1984; Cascetta and Nguyen, 1988; Bierlaire, 1995; Noriega and Florian, 2009), they are mainly inspired on a maximum likelihood estimation method, considering that the obsolete matrix follows a multivariate normal distribution, and they are part of the well known bi level programs (Codina et al., 2006; Codina and Barceló, 2000; Lundgren and Peterson, 2008). An important issue on these programs is finding a good algorithm to solve efficiently the corresponding problem for large-scale networks, where the computational cost to estimate an O-D matrix increases considerably.

During the last decades, gradient-based methods have been proposed (Spiess, 1990; Bierlaire, 1995; Florian and Chen, 1995; Codina and Barceló, 2000; Codina, 2002; Codina et al., 2006; Lundgren and Peterson, 2008). For instance, consider the resulting demand matrix $g = \{g_{pq}\}$ where $pq \in PQ$ denote O-D pairs; Spiess (1990) proposed a multiplicative steepest descent (MSD) method to estimate this O-D matrix with the solution of the following problem

$$\min_g Z(g) = \frac{1}{2} \sum_{a \in \bar{A}} (v_a(g) - \hat{v}_a)^2 \quad (1)$$

$$\text{s. t. } v(g) = \text{assign}(g) \text{ and } g_{pq} > 0, \quad \forall pq \in PQ \quad (2)$$

where $\bar{A} \subset A$ is the subset of links where counts are available and A the set of all links on the network, $\hat{v} = \{\hat{v}_a\}_{a \in \bar{A}}$ and $v(g) = \text{assign}(g) = \{v_a(g)\}_{a \in \bar{A}}$ represent the observed volumes and the volumes obtained after an assignment process with the matrix g , respectively. This assignment process must correspond to a convex optimization problem and it is understood as an equilibrium assignment to ensure the convexity of the model, see Florian (1977). In that work congestion effects were not considered.

Problem (1)-(2) has an infinite number of solutions, and a criterion is needed to select only one of them. Spiess proposed to choose the closest solution to a given obsolete matrix \hat{g} . He introduced the following multiplicative steepest descent method

$$g_{pq}^{l+1} = \begin{cases} \hat{g}_{pq} & \text{for } l = 0, \\ g_{pq}^l \left(1 - \lambda^l \frac{\partial Z(g^l)}{\partial g_{pq}} \right) & \text{for } l = 1, 2, \dots, L. \end{cases} \quad (3)$$

This multiplicative algorithm keeps the structure of the prior (obsolete) matrix, and its simplicity makes it applicable to large-scale networks. This algorithm is part of the EMME/4 transportation planning system (INRO, 2015).

In a previous work we solved the equilibrium transit assignment problem on an available transit network of Mexico City and its surroundings, employing the software system EMME/4 (see Juárez et al., 2013). This model, introduced by Spiess and Florian (1989), is based on the concept of optimal strategies and it allowed us to reproduce some scenarios of the real system: we obtained the impact of the total demand on the subway system and the total times during the peak hours in the morning of a normal day. Although our results replicate some features of this public transportation system, it is important to notice that the transit network is obsolete, since the most recent information in the database was included in 2010. In recent years a new subway line was added, as well as many other lines for other means of transportation; also the public transportation system has been reorganized. Furthermore, the O-D matrix was built up in 2007 and its last update occurred in 2012. This situation motivated us to consider the problem of estimate an O-D matrix from an obsolete one.

In 2014, we adapted the ideas of Spiess (1990) and Noriega and Florian (2009) to estimate an O-D matrix for a transit network (Chávez and Juárez, 2014). Additionally, we proposed a penalized model based on generalized least squares and we solved it by a multiplicative conjugate gradient (MCG) algorithm applied to the transit network of Winnipeg. Subsequently, in 2015, we tested our model with different values for the penalty parameter and compared the results obtained with the methodology of Spiess (Juárez and Chávez, 2015). Those numerical results showed that the computational cost of Spiess's methodology is higher than the computational cost of our methodology.

In this paper we show that the methodology used before can be successfully applied to much bigger transit networks, like the network of Mexico City and surroundings. The paper is organized as follow: in section 2 the O-D matrix estimation problem is described, in section 3 we describe the multiplicative conjugate gradient algorithm used in this paper, in section 4 we show some results for the transit network of Mexico City and finally, in section 5 we give some conclusions.

2. THE O-D MATRIX ADJUSTMENT PROBLEM

Given an obsolete O-D matrix, denoted by $\hat{g} = \{\hat{g}_{pq}\}$, we aim to find a new O-D matrix $g = \{g_{pq}\}$, close to \hat{g} , such that the resulting volumes (after a linear assignment of g) are equal or very near to the observed volumes $\hat{v} = \{\hat{v}_a\}$, $\forall a \in \bar{A}$. More precisely, we want to find an O-D matrix g that solves

$$\min_g Z(g) = \frac{1}{2} \sum_{pq \in PQ} (g_{pq} - \hat{g}_{pq})^2 \quad (4)$$

$$s. t. \quad \hat{v}_a = v_a(g), \quad \forall a \in \bar{A} \quad (5)$$

$$v_a(g) = assign(g). \quad (6)$$

Problem (4)–(6) is a variant of a control (or inverse) problem and it is ill-posed. So, to find a solution, a regularization procedure is needed first. Actually, problem (4)–(6) can be thought as one in which we want to take the transit system to a desired state given by (5), using a control variable: the demand matrix g . To find a solution, equation 5 is relaxed and we look for a demand matrix g such that $v_a(g)$ is as close as possible to \hat{v}_a for each $a \in \bar{A}$. This is achieved penalizing the differences between these two quantities and adding them to the objective function. We obtain the following problem

$$\min_g Z(g) = \frac{1}{2} \sum_{pq \in PQ} (g_{pq} - \hat{g}_{pq})^2 + \frac{1}{2} \sum_{a \in \bar{A}} k_a (v_a(g) - \hat{v}_a)^2, \quad k_a > 0 \quad (7)$$

$$s. t. \quad v_a(g) = assign(g) = \hat{v}_a \text{ and } g_{pq} \geq 0 \quad \forall pq \in PQ, \quad (8)$$

where k_a is a penalty parameter for each $a \in \bar{A}$. Thus, condition (5) is enforced very accurately with high values of k_a , and this is demonstrated by the numerical results. It is possible that the measured volumes are more reliable or accurate on some segments than on others, and we may choose different values of k_a for each segment. Of course, a simple scheme is to choose $k_a = k > 0$ for all $a \in \bar{A}$. For instance, problem (7)-(8) is equivalent to the model proposed by Noriega and Florian (2009) when $k_a = \alpha / (1 - \alpha)$

$$\min_g Z(g) = \frac{\alpha}{2} \sum_{a \in \bar{A}} (v_a(g) - \hat{v}_a)^2 + \frac{1 - \alpha}{2} \sum_{pq \in PQ} (g_{pq} - \hat{g}_{pq})^2, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (9)$$

For us, it is more intuitive to use the penalty parameter k_a , because it indicates directly the given weight to the difference of volumes. In this paper we shall use a constant penalty parameter k .

3. A MULTIPLICATIVE CONJUGATE GRADIENT ALGORITHM

In the simplest case, the conjugate gradient algorithm to solve problem (7)-(8) can be formulated as follows

$$g_{pq}^{l+1} = \begin{cases} \hat{g}_{pq} & \text{for } l = 0, \\ g_{pq}^l + \lambda_l d_{pq}^l & \text{for } l = 1, 2, \dots, L. \end{cases} \quad \forall pq \in PQ. \quad (10)$$

In (10), $d^l = \{d_{pq}^l\}$ is a conjugate direction vector at iteration l and λ_l is the length step that minimizes the objective function along that direction. The starting value of the iterative process in (10) is the obsolete O-D matrix \hat{g} . In a planning context, the resulting matrix is expected to resemble as closely as possible the initial matrix, since it contains important structural information on the O-D movements. Following this idea, Spiess proposed the multiplicative iteration formula given by (3), which has the following properties: 1) a change in demand is proportional to the demand of the initial matrix, and 2) null coefficients are preserved (Spiess, 1990). Applying this idea to the conjugate gradient method, the iterative algorithm can be reformulated in the following way

$$g_{pq}^{l+1} = \begin{cases} \hat{g}_{pq} & \text{for } l = 0, \\ g_{pq}^l (1 + \lambda_l d_{pq}^l) & \text{for } l = 1, 2, \dots, L, \end{cases} \quad \forall pq \in PQ. \quad (11)$$

The new conjugate direction d_{pq}^{l+1} is generated with a linear combination of the previous conjugate direction and the current gradient. Thus

$$d_{pq}^l = g_{pq}^l \left[-\frac{\partial Z(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} \right] + \beta_l d_{pq}^l, \quad pq \in PQ, \quad (12)$$

and the constant β_l is such that the two directions d_{pq}^l and d_{pq}^{l+1} are conjugate to each other. Notice that in (12) we have multiplied the gradient by g_{pq}^l to preserve the multiplicative structure of the algorithm. The gradient in (12) can be computed from (7) using the chain rule

$$\frac{\partial Z(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} = g_{pq}^{l+1} - \hat{g}_{pq} + k \sum_{a \in \bar{A}} (v_a(g^{l+1}) - \hat{v}_a) \frac{\partial v_a(g^{l+1})}{\partial g_{pq}}, \quad pq \in PQ, \quad (13)$$

where we still need to compute the derivative of the flows $v_a(g)$. These segment volumes can be expressed as

$$v_a(g^{l+1}) = \sum_{pq \in PQ} \sum_{s \in S_{pq}} \delta_{as} h_s, \quad \forall a \in \bar{A}, \quad \text{and} \quad \delta_{as} := \begin{cases} 0 & \text{if } a \notin s, \\ 1 & \text{if } a \in s, \end{cases} \quad (14)$$

S_{pq} represents the set of used paths in the network to go from p to q , and h_s denotes the total flow along one path $s \in S_{pq}$. Equation 14 can be rewritten in terms of the path probabilities $\pi_s^{l+1} = h_s / g_{pq}^{l+1}$, $s \in S_{pq}$, $pq \in PQ$

$$v_a(g^{l+1}) = \sum_{pq \in PQ} g_{pq}^{l+1} \sum_{s \in S_{pq}} \delta_{as} \pi_s^{l+1}, \quad a \in \bar{A}. \quad (15)$$

Assuming that $\pi_s^{l+1} \approx \pi_s^l$, we get

$$\frac{\partial v_a(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} = \sum_{s \in S_{pq}} \delta_{as} \pi_s^l, \quad a \in \bar{A}, \quad pq \in PQ. \quad (16)$$

Therefore, from (13) and (16) we obtain

$$\frac{\partial Z(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} = g_{pq}^{l+1} - \hat{g}_{pq} + k \sum_{s \in S_{pq}} \pi_s^l \sum_{a \in \bar{A}} \delta_{as} (v_a(g^{l+1}) - \hat{v}_a), \quad pq \in PQ. \quad (17)$$

Note that the assumption $\pi_s^{l+1} \approx \pi_s^l$ is very reasonable, especially when the sequence $\{g^l\}$ is close to the optimum. It simplifies the computation of the gradient $\nabla Z(g)$ and also gives a “linear behavior” to $v_a(g)$, since $v_a(g + \lambda d) \approx v_a(g) + \lambda v_a(d)$ for $\|\lambda d\|$ small.

The optimal step length λ_l in (11) is the minimum of the one-dimensional quadratic function $\phi(\lambda_l) = Z(g^l + \lambda_l d^l)$. More precisely, it solves the problem

$$\min_{\lambda} \phi(\lambda_l) \approx \frac{1}{2} \sum_{pq \in PQ} (g_{pq}^l + \lambda_l d_{pq}^l - \hat{g}_{pq})^2 + \frac{k}{2} \sum_{a \in \bar{A}} (v_a(g^l) + \lambda_l v_a(d^l) - \hat{v}_a)^2, \quad k > 0, \quad (18)$$

$$\text{s. t. } \lambda_l d^l \leq 1, \text{ and } g_{pq}^l \geq 0, \quad \forall pq \in PQ, \quad (19)$$

which solution is

$$\lambda_l \approx \frac{\sum_{pq \in PQ} d_{pq}^l (\hat{g}_{pq} - g_{pq}^l) + k \sum_{a \in \bar{A}} v_a(d^l) (\hat{v}_a - v_a(g^l))}{\sum_{pq \in PQ} (d_{pq}^l)^2 + k \sum_{a \in \bar{A}} (v_a(d^l))^2}. \quad (20)$$

After obtaining g^{l+1} , the new conjugate direction is computed using formula (12), where the value of β_l is calculated with an adapted variant of the Hestenes-Stiefel formula (Nocedal and Wright, 2006)

$$\beta_l = \frac{\sum_{pq \in PQ} g_{pq}^{l+1} \frac{\partial Z(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} \left(\frac{\partial Z(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} - \frac{\partial Z(g^l)}{\partial g_{pq}} \right)}{\sum_{pq \in PQ} d_{pq}^l \left(\frac{\partial Z(g^{l+1})}{\partial g_{pq}} - \frac{\partial Z(g^l)}{\partial g_{pq}} \right)} \quad (21)$$

Notice that we have multiplied each term in the numerator by g_{pq}^{l+1} in order to keep the multiplicative structure of the iterative algorithm. Therefore, the multiplicative conjugate algorithm is the following.

Algorithm 1: Multiplicative conjugate gradient for O-D matrix adjustment.

Initialization. Given the initial obsolete demand $g^0 = \hat{g}$ and the observed volumes \hat{v}_a , do the following

1. Solve the problem $v(g^0) = \text{assign}(g^0)$ to get the segment flows and compute the gradient $\frac{\partial Z(g^0)}{\partial g_{pq}}$ with equation 17.

2. Compute the initial direction $d_{pq}^0 = -\frac{\partial Z(g^0)}{\partial g_{pq}}$, $pq \in PQ$.

Descent. For $l \geq 0$, assuming we know g^l , d^l , do the following steps

3. Solve the problem $v(d^l) = \text{assign}(d^l)$.

4. Compute λ_l using formula (20) with the known values g^l , d^l , $v(g^l)$, $v(d^l)$.

5. Update the demand matrix: $g_{pq}^{l+1} = g_{pq}^l (1 + \lambda_l d_{pq}^l)$, $\forall pq \in PQ$.

6. Compute the gradient of the objective function at g^{l+1} : apply formula (17).

Stopping criterion and new descent direction. Given $0 < \varepsilon \leq 1$ (the stopping parameter), do the following

7. If $\|\nabla Z(g^{l+1})\| \leq \varepsilon \|\nabla Z(g^0)\|$, take $g = g^{l+1}$, stop and exit.

8. Otherwise, compute β_l with formula (21).
9. Compute the new conjugate gradient direction d^{l+1} with formula (12).
10. Update the index: $l=l+1$ and return to step 3.

4. NUMERICAL RESULTS

The following numerical calculations were done in a HP computer with an Intel(R) Xenon(R) 3.4 GHz processor and 16 GB RAM by using EMME/4 software with a license size 12 (INRO, 2015). We consider the transit network of Mexico City, which consists in 1705 centroids, 7241 regular nodes, and 31720 links, 18 modes of public transportation, which are divided into transit, traffic and auxiliary modes. Traffic modes include private cars; transit modes include: subway, subway rail, light rail, tram, trolleybus, mexi-bus, among others; auxiliary modes are: subway correspondences, conveyors, access to metro-bus, suburban and pedestrian accesses. The network contains 845 transit lines that lead to 47004 segments. Engineers, from the sub-direction of strategic planning at METRO (i.e. the subway system), were able to calibrate all the parameters needed for the simulations, including the mean time of boarding, capacity of the public vehicles, volume-delay functions, capacity of the different vehicles for the different lines, headways, among many other values. The network is displayed in Figure 1, where the set of segments with available counts (\bar{A}) are shown in red.

The O-D matrix g used for these results is an updated projection of the demand matrix obtained by an O-D survey applied in Mexico City and neighboring municipalities in 2007, and subsequently updated in 2012. This matrix estimates the mobility on Mexico City during the morning from 6:00 to 9:00 am. In order to calibrate the proposed methodology, we constructed the following scenario: we did a transit assignment on this network with a previously known O-D matrix g at the peak hour in the morning; from this result we extracted the volumes, which play the role of measured volumes in the numerical experiments. Next, we generated an O-D matrix \hat{g} , disturbing stochastically the O-D matrix g by 20%. Then, with these data, we applied the multiplicative steepest descent (MSD) and the multiplicative conjugate gradient (MCG) algorithms, employing different values of the penalty parameter k . The MSD algorithm is depicted in (3) and the MCG algorithm is our proposal introduced above. To stop the iterations of the MCG (step 7) and of the MSD algorithms we choose $\varepsilon = 10^{-3}$. Our main interest is to test the ability of these algorithms to recover the original demand matrix g and the volumes \hat{v}_a , $a \in \bar{A}$, as well as the number of iterations and CPU time.

Table 1 shows the values of a least squares fit of the deviation from the original O-D matrix obtained with both iterative algorithms, MSD and MCG. Similarly, table 2 shows the correspondent values of the least squares fit of the adjusted volumes versus the real volumes. In both tables, the parameters b and m denote the parameters of the regression line, thus the

adjustment is better for those points that are closer to the correspondent line. The values R^2 and $RMSE$ denote the correlation coefficient and the square root of the mean squared error, respectively. More detailed information about the specific formulas to compute the regression parameters can be found in Chávez (2014) and Draper and Smith (1998). We also show the number of iterations to achieve convergence, to the given accuracy, as well as the required computational time (CPU) in seconds. Finally, in the last column we included the values of the sums $\sum_{pq \in PQ} (g_{pq} - \hat{g}_{pq})^2$ and $\sum_{a \in A} (v_a(g) - \hat{v}_a)^2$.

Numerical results in Table 1 show that the MSD algorithm does much more iterations than the MCG algorithm to achieve the same accuracy: for $k = 1000$ and ∞ (limiting cases), it does 3.6 and 4 times more iterations than the MCG, respectively. The CPU time employed with both algorithms exhibits the same ratio, i.e. the MCG algorithm is about four times faster than the MSD algorithm to compute the same O-Matrix. Thus, the additional work to compute β_l in (21) at each iteration of the MCG algorithm is marginal with respect to the overall calculation.

Concerning to the influence of the penalty parameter, it can be observed that for the MCG algorithm the numerical results remain almost the same. Figures 2 and 3 are plots of the demand deviations and flow comparison for $k = 1000$, and Figures 4 and 5 for $k = \infty$, respectively. These two figures also corroborate that the results obtained with the MSD algorithm are quite similar to those obtained with the MCG algorithm.

Finally, Figure 6 shows the decrease of the objective function for the first 45 iterations when $k = \infty$.

Table 1. Demand deviation regression coefficients and convergence of MSD and MCG

| K | Method | b | m | R^2 | $RMSE$ | Iters. | CPU (s) | $\sum_{pq \in PQ} (g_{pq} - \hat{g}_{pq})^2$ |
|----------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|---------|--|
| 100 | MSD | 0.526 | 0.944 | 0.991 | 31.252 | 187 | 5920 | 19106.20 |
| | MCG | 0.531 | 0.944 | 0.991 | 31.278 | 50 | 1617 | 19083.55 |
| 1000 | MSD | 0.509 | 0.944 | 0.991 | 31.253 | 190 | 5905 | 19140.27 |
| | MCG | 0.457 | 0.945 | 0.991 | 31.225 | 75 | 2431 | 19401.58 |
| 10000 | MSD | 0.508 | 0.944 | 0.991 | 31.254 | 190 | 6014 | 19142.47 |
| | MCG | 0.471 | 0.945 | 0.991 | 31.243 | 52 | 1692 | 19342.32 |
| ∞ | MSD | 0.504 | 0.944 | 0.991 | 31.252 | 192 | 6016 | 19159.23 |
| | MCG | 0.504 | 0.944 | 0.991 | 31.252 | 47 | 1548 | 19361.01 |

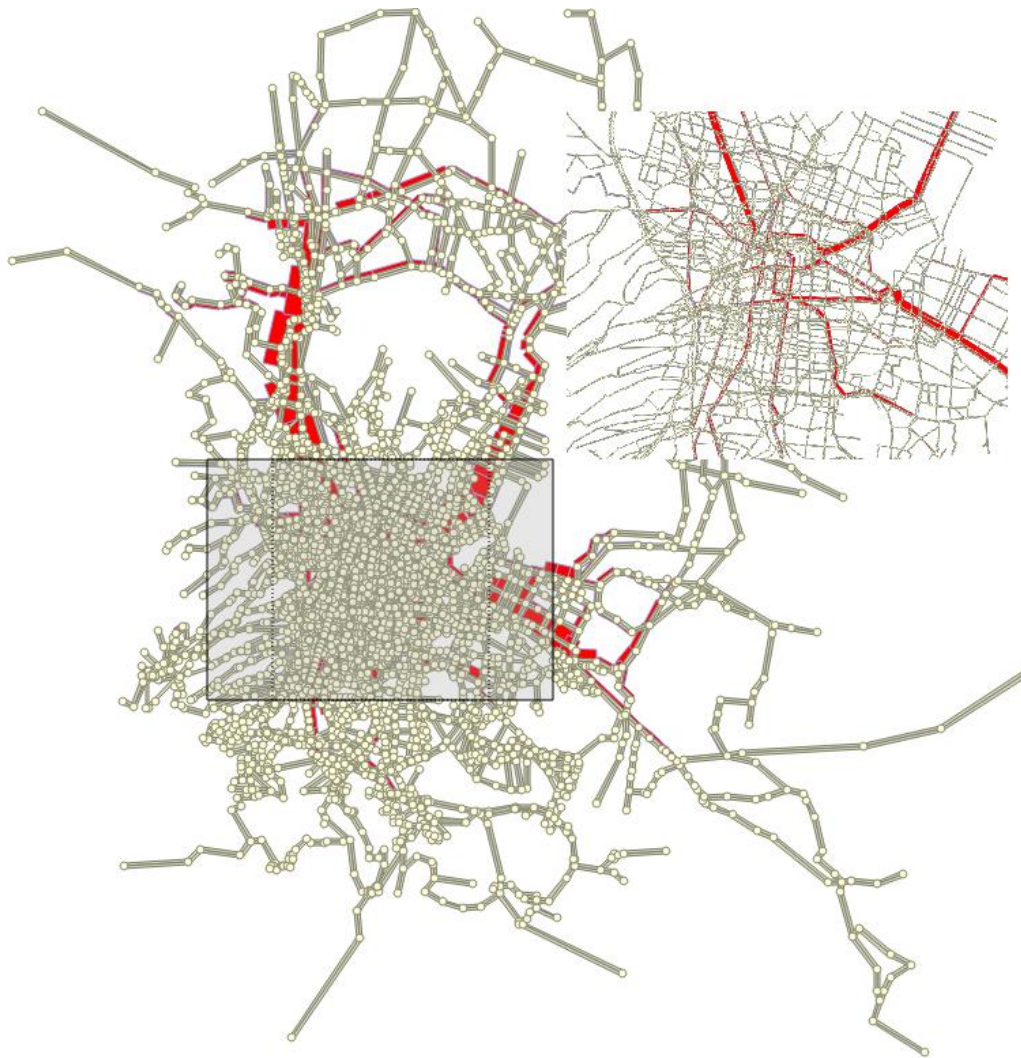


Figure 1. Segment counts on the transit network of Mexico City

Table 2. Volume deviation regression coefficients

| K | Method | b | m | R^2 | $RMSE$ | Iters | CPU (s) | $\sum_{a \in A} (v_a(g) - \hat{v}_a)^2$ |
|----------|--------|---------|-------|-------|--------|-------|---------|---|
| 100 | MSD | -11.934 | 1.000 | 1.000 | 66.902 | 187 | 5920 | 6715.08 |
| | MCG | -11.546 | 1.000 | 1.000 | 68.603 | 50 | 1617 | 7053.87 |
| 1000 | MSD | -10.747 | 1.000 | 1.000 | 66.481 | 190 | 5905 | 6620.50 |
| | MCG | -8.124 | 1.000 | 1.000 | 60.207 | 75 | 2431 | 5401.62 |
| 10000 | MSD | -10.739 | 1.000 | 1.000 | 66.479 | 190 | 6014 | 6620.04 |
| | MCG | -8.982 | 1.000 | 1.000 | 62.109 | 52 | 1692 | 5747.93 |
| ∞ | MSD | -10.538 | 1.000 | 1.000 | 66.058 | 192 | 6016 | 6533.78 |
| | MCG | -10.538 | 1.000 | 1.000 | 66.058 | 47 | 1548 | 5877.18 |

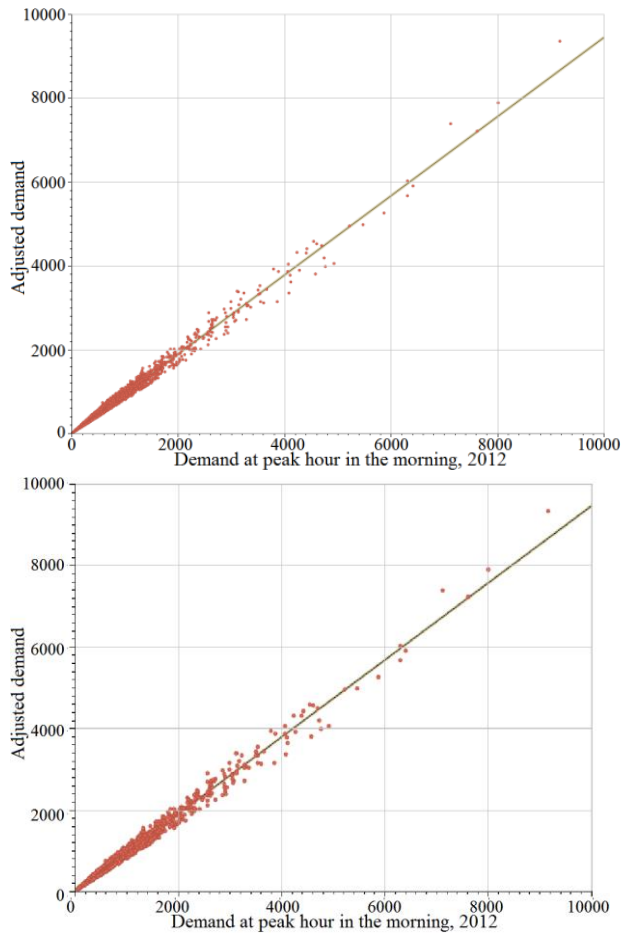


Figure 2. Demand deviations for the MSD (left) and MCG (right) algorithms with $k = 1000$

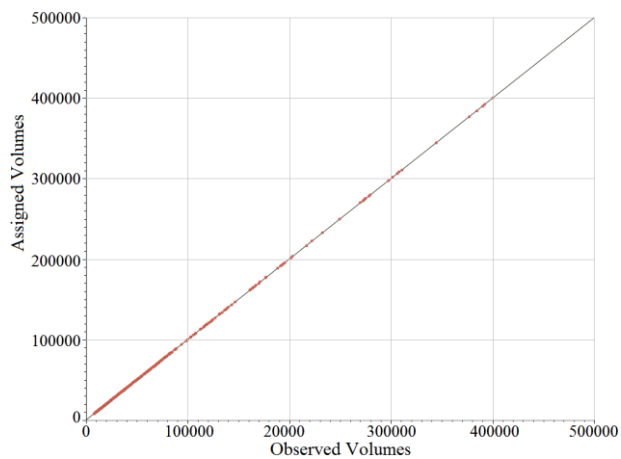


Figure 3. Flow deviations for the MSD (left) and MCG (right) algorithms with $k = 1000$

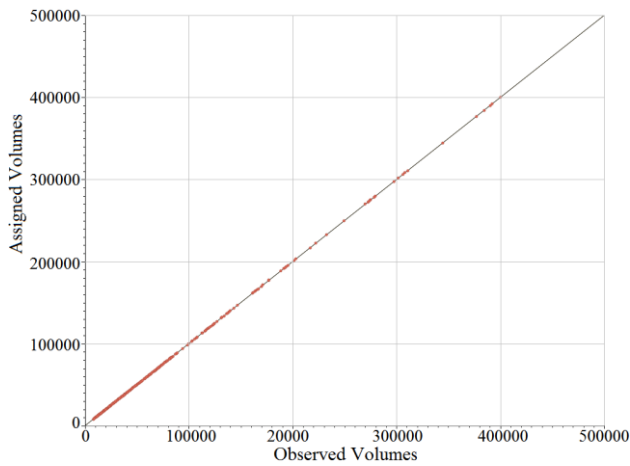


Figure 3 continuation. Flow deviations for the MSD (left) and MCG (right) algorithms with $k = 1000$

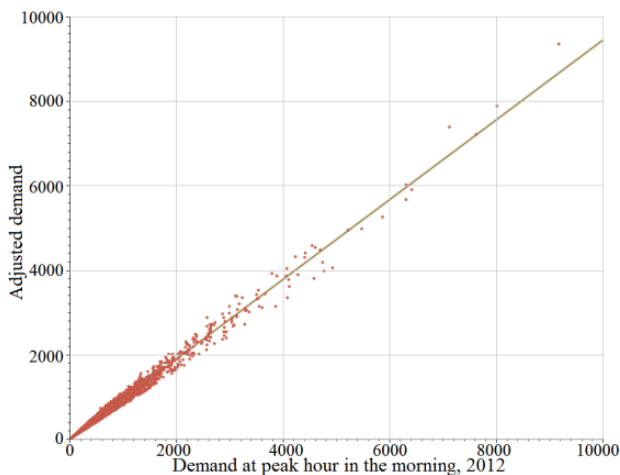
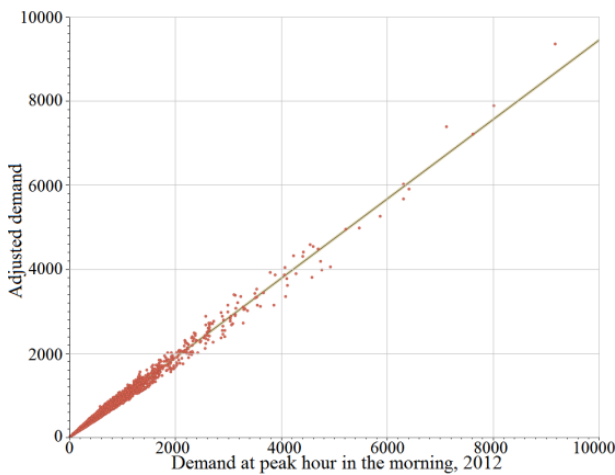


Figure 4. Demand deviations for the MSD (left) and MCG (right), obtained with the model of Spiess

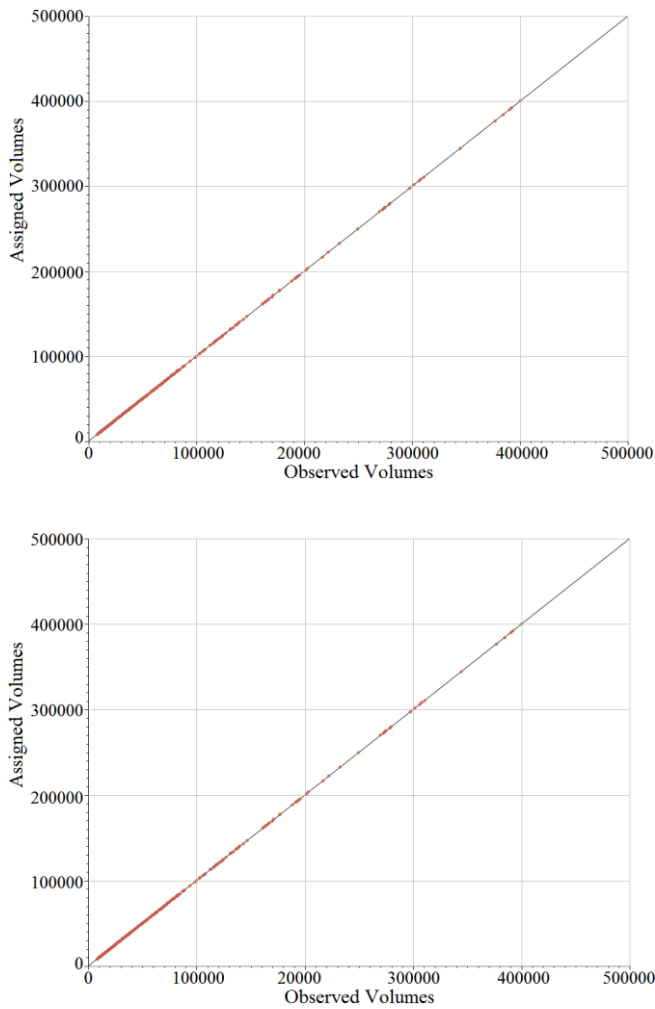


Figure 5. Demand deviations for the MSD (left) and MCG (right), obtained with the model of Spiess

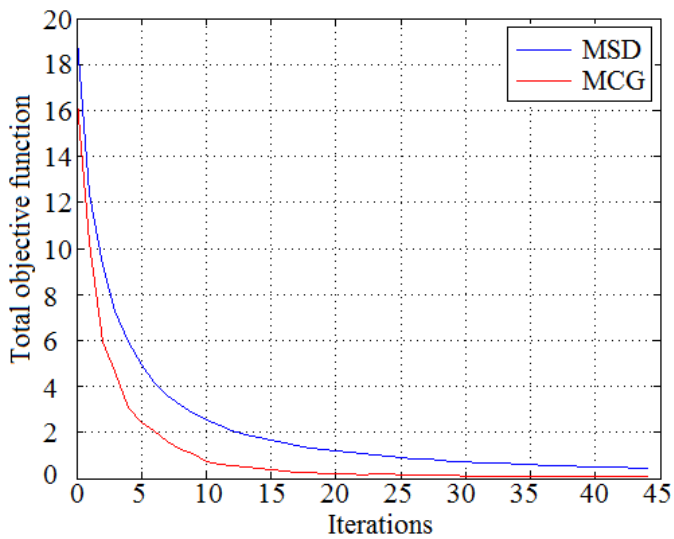


Fig 6. Objective function vs. iteration for MSD and MGC algorithms for the model of Spiess

5. CONCLUSIONS

We studied an O-D matrix demand adjustment model for transit networks, which is based on available volume data on some known segments. This model was introduced in a previous work (Chávez and Juárez, 2014), and it is a variant of known existing models. It incorporates the constraints as penalized terms to the objective function; see (7)–(8). To solve the optimization problem we employed a multiplicative conjugate gradient algorithm. The performance of this algorithm was compared with the method of steepest descent of Spiess (1990). Both methods produced very similar solutions, but with the advantage that the conjugate gradient algorithm does much less iterations to get the same accuracy and, consequently, it is about 3.5 to 4 times faster than the steepest descent algorithm of Spiess, at least for the transit network considered in this work. Initially, we thought that a potential drawback of the MCG algorithm could be that it does more flops per iteration than the MSD algorithm, mainly due to the computation of β_i with (21). However, this is not the case, since the ratio of CPU between both algorithms is about the same than the ratio of number of iterations, which suggest that the additional CPU time to compute β_i is marginal.

There are additional issues that we still need to investigate further, like the convergence properties of the MCG algorithm, which is related to the behavior of the conjugate directions d^l in the iterative process. Also, it will be interesting to apply the general penalized model (7)–(8), allowing different penalization parameters for different segments. Also, it may be possible to improve the performance of the MCG algorithm with a good preconditioner in order to reduce further the number of iterations. A pending task is to test how our approach compares with more recent models and techniques, like bi level programming techniques, but in the context of transit assignment.

Finally, we want to comment that an important case arises with scenarios where congestion plays a strong role. In this case transit assignment with a linear basic model may not be a valid choice to update the O-D matrix, because the optimization program is not longer convex. This is a crucial issue for large networks in big metropolitan areas, which are commonly congested at peak hours. This drawback is also shared by the steepest decent method of Spiess. Large transit networks may require a different approach, for instance a heuristic algorithm to get closer to a minimum, and then switch to a traditional descent algorithm when approaching to the optimal value.

ACKNOWLEDGEMENTS

We acknowledge the help of the sub-direction of strategic planning at METRO (subway system in Mexico City) and the engineers who facilitated us all the information and databases they collected and constructed over the years; and also for sharing their projects and problems. We also want to thank Professor Michael Florian and his assistant, Yolanda

Noriega, for their hospitality, help and advice to the first author, when she was doing an internship at CIRRELT (University of Montreal) to get training in the use of EMME/4 software. Also, we would like to acknowledge the financial support of the math graduate program at UAM-Iztapalapa and the Mathematics and Development Network of CONACYT in Mexico.

REFERENCES

- BERA S. AND RAO K. (2011). *Estimation of Origin-Destination Matrix from Traffic Counts: the State of the Art*. European Transport (49), pp. 3-23.
- BIERLAIRE M. (1995). *Mathematical Models for Transportation Demand Analysis*. Ph.d. thesis, Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix de Namur, Faculté des Sciences, Département de Mathématique, Namur.
- CASCETTA E. (1984). *Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: a generalized least squares estimator*. Transportation Research Part B: Methodological 18, pp. 289-299.
- CASCETTA E. AND NGUYEN S. (1988). *A Unified Framework for Estimating or Updating Origin/Destination Matrices from Traffic Counts*. Transportation Research Part B 22B(6), pp. 437-455.
- CHÁVEZ, M. (2014). *Modelos matemáticos para análisis de demanda en transporte*. Master's thesis, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Department of Mathematics, Ciudad de México.
- CHÁVEZ, M. AND JUÁREZ, L. (2014). *A Multiplicative Conjugate Gradient Method for the O-D Adjustment Matrix*. R. Z. Ríos-Mercado et al., (Eds.): Recent Advances in Theory, Methods, and Practice of Operations Research, pp. 97-104.
- CODINA, E. (2002). *Consistency of an Approximation to the Upper Level Objective Function Gradients in the O-D Demand Adjustment Problem*. Tech. rep., Departament d'Estadística i Investigació Operativa, Universitat Politècnica de Catalunya, Spain, Research Report DR/2002-01.
- CODINA, E. AND BARCELÓ, J. (2000). *Adjustment of O-D Trip Matrices from Traffic Counts: an Algorithmic Approach Based on Conjugate Directions*. Proceedings of the 8th Euro Working Group on Transportation, pp. 427-432.
- CODINA, E., GARCÍA, R. AND MARÍN, A. (2006). *New Algorithmic Alternatives for the O-D Matrix Adjustment Problem on Traffic Networks*. European Journal of Operation Research 175(3), pp. 1484-1500.
- DRAPER, N. AND SMITH, H. (1998). *Applied Regression Analysis*. 3rd ed. John Wiley and Sons.
- FLORIAN, M. (1977). *An Improved Linear Approximation Algorithm for the Network Equilibrium (packet switching) Problem*. IEEE Proc. Decision and Control, pp. 812-828.
- FLORIAN, M. AND CHEN, Y. (1995). *A Coordinate Descent Method for the Bi-Level O-D Matrix Adjustment Problem*. International Transactions on Operations Research 2(2), pp. 165-179.

- INRO (2015). *The evolution of transport planning*. Available at <http://www.inrosoftware.com/en/products/emme/index.php>
- JUÁREZ, L., FERNÁNDEZ, A., DELGADO, J., CHÁVEZ, M., AND OMAÑA, E. (2013). *Asignación de tránsito en la red metropolitana del Valle de México y su impacto en el stc-metro*. *Contactos. Revista de educación en ciencias e ingeniería* (90), pp. 85-95.
- JUÁREZ, L. AND CHÁVEZ, M. (2015). *O-D Matrix Adjustment for Transit Networks by Conjugate Gradient Iterations*. *Revista Investigación Operacional* 36(2), pp. 85-95.
- LUNDGREN, J. AND PETERSON, A. (2008). *A Heuristic for the Bilevel Origin-Destination Matrix Estimation Problem*. *Transportation Research Part B: Methodological* 42(4), pp. 339-354.
- NOCEDAL, J. AND WRIGHT, S. (2006). *Numerical Optimization*. 2nd ed. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering.
- NORIEGA, Y. AND FLORIAN, M. (2009). *Some Enhancements of the Gradient Method for O-D Matrix Adjustment*. Tech. Rep. 4, CIRRELT.
- SPIESS, H. (1987). *A Maximum-Likelihood Model for Estimating Origin-Destination Matrices*. *Transportation Research Part B: Methodological* 21(5), pp. 395-412.
- SPIESS, H. AND FLORIAN, M. (1989). *Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks*. *Transportation Research Part B: Methodological* 23(2), pp. 83-102.
- SPIESS, H. (1990). *A Gradient Approach for the O-D Matrix Adjustment Problem*. EMME/2 Support Center, Switzerland, <http://www.spiess.ch/emme2/demadj/demadj.html>
- VAN ZUYLEN, H. AND WILLUMSEN, L. (1980). *The Most Likely Trip Matrix Estimated from Traffic Counts*. *Transportation Research Part B: Methodological* 14B, pp. 281-293.

4 Análise preliminar das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) no BRT Sul de Brasília/DF a partir da usabilidade

Roberto Bernardo da Silva
Evaldo Cesar Cavalcante Rodrigues
José Matsuo Shimoishi
Adelaida Pallavicini Fonseca
Universidade de Brasília, Brasil

RESUMO

O principal objetivo deste trabalho é analisar as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) do BRT Sul de Brasília/DF a partir da usabilidade segundo a percepção dos usuários. Para isso, foi desenvolvida uma pesquisa descritiva com abordagem qualitativo-quantitativa. Empregou-se *brainstorming* com os funcionários-especialistas da SEMOB e do DFTRANS a fim de definir os critérios e subcritérios percebidos pelos usuários para análise das TIC na usabilidade do sistema BRT Sul. Neste trabalho foram analisados os critérios: Aprendizado; Eficiência; Memorização; Erros e Satisfação. As principais informações obtidas foram relativas aos critérios e subcritérios analisados, assim como a informações sócio-demográficas dos usuários. Para análise dos dados utilizou-se a metodologia Multicritério de Apoio à Decisão – Construtivista (MCDA-C), visto que a mesma possibilita analisar quantitativamente um problema qualitativo e, além disso, permite comparar a visão dos decisores com a dos usuários. Os resultados mostraram que os usuários estão muito insatisfeitos com as TIC existentes no sistema BRT Sul de Brasília/DF, ou desconhecem a existência das TIC no referido sistema.

Palavras-chave: Transporte Público Coletivo (TPC), Bus Rapid Transit (BRT), Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), Usabilidade.

1. INTRODUÇÃO

O sistema proposto para o Eixo Sul de Brasília é composto por um serviço básico tronco alimentado flexível, com integração físico-tarifária entre linhas alimentadoras e troncais, que atendam aos usuários das cidades do Gama, de Santa Maria e Entorno Sul. As linhas alimentadoras, de ligação e do entorno Sul transportam os passageiros dos locais de origem até os terminais de onde partem linhas troncais (expressas e paradoras) com destino ao Plano Piloto. As linhas troncais circulam por vias com faixas exclusivas (exceto no eixo rodoviário, junto ao canteiro central e com ultrapassagem nos pontos de parada).

O sistema BRT Sul tem de 43 km de extensão de corredores exclusivos. O sistema utiliza veículos articulados, com capacidade para cerca de 160 passageiros, e biarticulados, que irá trafegar nos horários de pico com uma capacidade de 200 passageiros. O tempo de viagem, que antes era de 90 min., hoje é de aproximadamente de 50 minutos, e deve ser reduzido para 40 minutos quando o novo sistema estiver em plena operação.

Ao longo do percurso, existem 10 estações com embarque em nível e 15 passarelas para maior segurança dos usuários. O projeto também contempla terminais de integração com os ônibus convencionais e metrô. A proposta do BRT Sul prevê o uso de veículos híbridos e elétricos, já que o projeto também envolve a questão ambiental. Os ônibus são monitorados por um Centro de Controle Operacional (CCO), que repassará aos usuários informações precisas por meio de painéis eletrônicos (PMV).

Diante dessa realidade, o objetivo desse trabalho é analisar preliminarmente as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) do sistema BRT Sul de Brasília/DF segundo a percepção dos usuários, a partir da usabilidade, por meio da aplicação da Análise Multicritério de Apoio a Decisão (MCDA), a fim de qualificar a relação do usuário com a tecnologia, ou com os equipamentos formadores do sistema BRT Sul. A hipótese de base é que as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) que apresentam tecnologias de maior utilidade para os usuários, que tras informações acuradas sobre o transporte público coletivo (TPC), assim como as TIC que possibilitam um maior grau de usabilidade são também as mais perceptíveis de melhora validadas no sistema BRT Sul, com base na amostra selecionada formada pelo grupo heterogêneo dos usuários, pois a usabilidade é uma dimensão comum a todos os usuários entrevistados.

Se for confirmada essa hipótese, a abordagem na usabilidade pode ser um válido referencial para tomada de decisões, visto que a relação homem-tecnologia muitas vezes não é algo tão simples quanto parece e é de difícil mensuração quantitativa, principalmente quando existe um universo de usuários muito heterogêneo, representativo de todas as classes econômicas da sociedade e com faixas etárias distintas, como no caso do sistema BRT Sul.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 BRT (Bus Rapid Transit)

Para Reis et al., (2013), dentro das modalidades de transporte público, há o sistema BRT (Bus Rapid Transit) ou em português o Transporte Rápido por Ônibus. Esse modo é considerado extremamente viável nas grandes e médias cidades, fazendo com que os ônibus tenham sua eficácia máxima operacional, baseado na eliminação de todos os tipos de interferências possíveis em uma via, gerando exclusividade de locomoção por meio de vias utilizadas somente por BRT.

Segundo o Manual de BRT, o Transporte Rápido por Ônibus, BRT, opera em faixas

exclusivas com prioridade de passagem no nível da superfície, e em alguns casos passagens subterrâneas ou túneis são utilizados para proporcionar separação de nível em interseções ou áreas centrais densas.

Ainda de acordo com os mesmos autores, a ideia de se fazer tal sistema torna-se importante, pois busca evitar outras questões do viário que implicam em perdas operacionais, além de alguns outros fatores tais quais: a presença de pedestres, conversões de veículos, cruzamentos, acidentes, entre outros.

Ainda segundo Reis et al., (2013), a criação da estrutura para a utilização do BRT busca a macro acessibilidade dos passageiros, transportando-os de um terminal ao outro, unidos por eixos exclusivos. Por este motivo, há um maior aproveitamento de frota, pois consegue-se uma redução significativa do tempo de percurso, de avarias de veículos, devido aos baixíssimos números de ocorrências na via e da boa conservação da mesma, obviamente não podendo generalizar a todas as regiões que é utilizado.

Segundo Rebelo (2010), o grande diferencial do BRT, em relação aos outros modos, é a flexibilidade da oferta. Este sistema pode começar com uma operação mínima, de três mil passageiros/hora, por exemplo, e depois chegar a comportar uma demanda de até quarenta e cinco mil passageiros por hora e por sentido. Dentro de qualquer operação deve haver a consciência das oscilações de demanda que existem, para efetuar uma operação enxuta. O BRT consegue adequar-se a queda de demanda, assim evitando desperdícios com mão-de-obra, uso e desgaste de veículos em baixa demanda de utilização.

De acordo com Levinson (2003), o sistema BRT é considerado a melhor opção para a mobilidade urbana por se encaixar como a solução mais barata, rápida e moderna para todos os desafios das grandes cidades. Considerado um modo de transporte público sobre pneus, veloz e flexível, que combina estações, veículos, serviços, vias e elementos de sistema inteligente de transporte (ITS) em um sistema integrado com uma forte identidade positiva, evocando uma imagem de modernidade e agilidade.

O grande problema para o transporte público é a velocidade comercial das linhas, uma vez que não há fluidez de tráfego, fazendo com que os tempos de ciclo (tempo de percurso total da linha) aumentem consideravelmente, diminuindo o número de partidas com determinados números de veículos. Segundo o Ministério das Cidades (2008), o número de ônibus necessários para transportar passageiros a 20 km/h por hora é a metade do número necessário quando a velocidade comercial é apenas 10 km/h. Criar condições para aumentar a fluidez do transporte público é essencial também para conter tarifas.

2.2 Tecnologias da Informação e Comunicação (TIC)

As Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) podem ser compreendidas como um conjunto de recursos tecnológicos que proporcionam um novo modo de se comunicar.

Surgiu, no decorrer da história, no cenário da Terceira Revolução Industrial e foi gradualmente se desenvolvendo a partir da década de 70, ganhando atenção sobretudo na década de 1990.

Algumas das maiores características das TIC são a agilidade, a horizontalidade e a possibilidade de manipulação do conteúdo da comunicação e informação mediante a digitalização e comunicação em redes. Essa nova dinâmica das relações entre as pessoas foi desenhando o que hoje se conhece conceitualmente como a Sociedade da Informação e do Conhecimento, alicerçada sobretudo, por redes de comunicação telefônica e virtual.

Segundo Sorj (2003), as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) ocupam um papel central nos novos formatos de produção de conhecimento, educação, trabalho e comunicação em geral. Nesta perspectiva elas permitem a formação de uma sociedade em rede (Castells, 2003), em que a troca de informações, ideias, serviços e produtos tornam-se um diferencial nos relacionamentos pessoais e profissionais.

Para Dahmer e Fleury (2010), a crescente difusão das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) vem contribuindo também na emergência de novos modelos de educação e aprendizagem. Estes modelos são amparados nas novas formas de interação e colaboração, na conexão com redes globais de organizações e de indivíduos e no estabelecimento de novas dinâmicas para o desenvolvimento e aprimoramento de competências individuais e organizacionais.

2.3 Usabilidade

De acordo com Cybis et al., (2010), as interfaces ergonômicas devem ser desenvolvidas de modo a respeitar não só as características do sistema de informação como também as do indivíduo. Uma mesma interface pode gerar percepções diversas entre os usuários, pois cada um tem uma forma diferente de interpretar os estímulos recebidos. Portanto, o foco da usabilidade é a facilidade de uso de determinada interface.

Ainda de acordo com esses autores, a usabilidade é um atributo que caracteriza o uso de um sistema interativo e está associada à interação entre usuário, tarefa, interface, equipamento e aspectos do ambiente. Sendo esses os fatores que constituem o cerne da usabilidade. Além disso, ela pode ser caracterizada segundo a facilidade de uso, facilidade de aprendizado, eficácia e eficiência na realização de uma tarefa pelo indivíduo.

Em suma, a usabilidade se configura como um atributo de qualidade que permite avaliar a facilidade de uso de uma interface sob a perspectiva do usuário. Para avaliá-la é necessário verificar o nível de eficiência, eficácia e satisfação percebidas pelo indivíduo ao utilizar o sistema/interface.

Conforme salientam Cybis et al., (2010), a eficiência ocorre quando o usuário atinge seu

objetivo na realização da tarefa utilizando a menor quantidade de recursos possível, sendo eles esforço físico, cognitivo ou tempo empregado. Do mesmo modo, a eficácia é o sentimento de alcance do objetivo após realizar a tarefa. Finalmente, satisfação é a sensação positiva que a pessoa tem ao conquistar seus resultados frente aos recursos exigidos para atingi-lo.

Atualmente, a usabilidade é abordada de maneira mais ampla. Assim, o conceito de experiência do usuário tem sido introduzido na perspectiva da usabilidade, visto que ele propicia uma visão mais abrangente acerca dos atributos de qualidade de um produto ou sistema.

No entanto, para o contexto da usabilidade é pertinente fazer essa análise sob a ótica da cognição. Sendo assim, resume-se a experiência do usuário como um “conjunto de todos os processos (físicos, cognitivos e emocionais) desencadeados no usuário a partir da sua interação com um produto ou serviço em diversos momentos em um determinado contexto de uso” (Cybis et al., 2010).

3. METODOLOGIA

A pesquisa foi elaborada durante o segundo semestre de 2015. A coleta de dados foi feita entre os dias 10 e 12 de novembro de 2015. O trabalho seguiu as seguintes etapas: revisão da literatura; plano de pesquisa; definição de critérios; coleta de dados e análise dos dados.

3.1 Tipos de Pesquisa

Conforme explicita Santos (2000), o caráter qualitativo da pesquisa está no enfoque na percepção dos envolvidos sobre a problemática estudada. Isto é, o outro foco da coleta de dados está em captar a opinião dos representantes da Secretaria de Estado de Mobilidade do Distrito Federal – SEMOB, e da Transporte Urbano do Distrito Federal – DFTRANS. Para isso, foram realizadas reuniões com o objetivo de levantar aspectos fundamentais para o estudo das TIC na usabilidade do sistema BRT Sul.

De acordo com Richardson e colaboradores (1999), a pesquisa quantitativa é recomendada para medir opiniões, comportamentos e atitudes. Além disso, é bastante apropriada para verificar quantas pessoas de uma população compartilham determinada característica. Nesse sentido, é mais adequada para avaliar a opinião dos usuários-clientes do sistema BRT Sul.

Sendo assim, o estudo possui caráter descritivo, já que o objetivo é levantar opiniões e também identificar a relação entre variáveis. Nesta pesquisa, foi feito um levantamento não só junto aos usuários-clientes do sistema BRT Sul, como também junto aos representantes da Secretaria de Estado de Mobilidade do Distrito Federal, e da Transporte Urbano do Distrito Federal no sentido de apurar as percepções e opiniões de ambos acerca da problemática estudada nessa pesquisa.

3.2 População e Amostra

O lócus de pesquisa escolhido foi a Transporte Urbano do Distrito Federal (DFTRANS), autarquia pública responsável por regular e fiscalizar o sistema BRT Sul de Brasília/DF. Dessa forma, a população desse estudo é composta pelos usuários do BRT Sul. No entanto, uma pesquisa com todas essas pessoas seria muito onerosa em termos de tempo, acesso e recursos devido à quantidade de usuários diários, cerca de 95 mil usuários/dia. Portanto, preferiu-se extrair uma amostra dessa população.

Para estudos que utilizam da metodologia Multicritério de Apoio à Decisão – Construtivista são consideradas as medianas após a tabulação dos dados. O cálculo da amostra significativa e estudos indicaram que a amostra deveria ser de 384 usuários, porém, em trabalhos similares foi utilizada uma amostra de 500 usuários que gerou um resultado; utilizando regressão matemática e ao selecionar 155 respostas de usuários-clientes aleatoriamente desse grupo, o resultado da mediana foi o mesmo.

Nesse sentido, fica ratificado que ao optar por 155 usuários se atinge o mesmo resultado da mediana correspondente aos 500 usuários pesquisados. Dessa forma, nessa pesquisa foram aplicados 51 formulários junto aos usuários-clientes do sistema BRT Sul, obtendo um grau de confiança de 85,3%, conforme regressão matemática realizada nos estudos de Rodrigues (2014).

Nessa pesquisa, optou-se pela amostragem aleatória simples, pois, segundo Richardson e colaboradores (1999), esse tipo de amostra tem menor complexidade de cálculo, requer um conhecimento mínimo da população e é de fácil análise. Santos (2014) ressalta que nesse tipo de amostragem, todos os elementos têm a mesma chance de serem selecionados, ou seja, ao realizar o sorteio todos possuem a mesma probabilidade de fazer parte da amostra.

Sendo assim, foram pesquisados usuários cativos, intermitentes e novatos do sistema BRT Sul. A escolha por esses elementos da população se justifica pelo fato de que são esses usuários-clientes os mais afetados pela usabilidade das TIC do sistema BRT Sul e, por isso, serem também os mais indicados para fazer essa avaliação.

3.3 Plano resumido de Coleta e Análise de Dados

A coleta de dados baseou-se em dois momentos. No primeiro foi realizada uma reunião com um membro da Diretoria Técnica do DFTRANS a fim de conhecer os aspectos fundamentais para usabilidade das TIC do sistema BRT Sul. Em outro momento, foi feita uma discussão de grupo com os funcionários das diretorias da SEMOB e do DFTRANS para discutir e validar os Elementos Primários de Avaliação (EPA's) que deram base para aos itens do formulário.

Para a coleta de dados junto aos usuários-clientes, construiu-se um formulário estruturado de entrevista baseado em 5 Pontos de Vistas Fundamentais (PVF's): Aprendizado;

Eficiência; Memorização; Erros e Satisfação; e 10 Pontos de Vistas Elementares (PVE's). Cada categoria foi composta por itens elaborados com base nos principais aspectos que caracterizam a usabilidade das TIC do sistema BRT Sul.

Nessa perspectiva, foram feitas perguntas relacionadas à indicação de informações nos terminais ou estações da existência de TIC, cumprimento dos horários informados, cumprimento dos trajetos informados, interface do aplicativo, orientações voltadas para portadores de necessidades especiais (PNE), disponibilidade de assentos e espaços reservados para esse tipo de usuário e existem funcionários para acompanhar os PNE.

A escolha pela utilização de formulários estruturados se deu pelo fato de que, segundo Gil (2010), são os instrumentos para coleta de dados mais apropriados para coletar opinião pública e permite a aplicação em locais movimentados, como é o caso do BRT Sul. Nessa técnica existe a objetividade dos formulários e o contato direto da entrevista, visto que o pesquisador deve estar presente, registrar as respostas e esclarecer possíveis dúvidas, se for necessário. Os formulários foram aplicados aos usuários-clientes do sistema BRT Sul.

A análise dos dados provenientes dos formulários foi feita utilizando a metodologia Multicritério de Apoio à Decisão – Construtivista. Esses dados foram manipulados com base na Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) e dentro de uma versão adaptada do *software* M-MACBETH para o *software* MAMA Decisão, *software* desenvolvido por pesquisadores da FACE-UnB, assim como do GPIT-PPGT-UnB.

A MCDA-C originou-se da Análise Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA) com o propósito de apoiar os decisores em situações que envolviam muitas variáveis quantitativas e qualitativas, além de múltiplos atores com interesses diversos. Esse método se utiliza de uma lógica construtivista, no qual o seu foco principal é a geração de conhecimento para apoiar a deliberação dos decisores.

Os atores são indivíduos, grupos de indivíduos ou instituições que têm um papel no processo decisório. Por isso, devem ser considerados não só os indivíduos que participam ativamente da decisão, mas também os sujeitos que apenas sofrem as consequências, visto que eles influenciam indiretamente o processo. Os atores podem ser divididos em dois grupos: intervenientes e agidos.

O primeiro grupo é composto por atores que participam de forma direta do processo decisório e, por isso, suas ações e valores têm impacto direto no contexto. O segundo grupo é formado pelos atores que participam de maneira passiva desse processo, isto é, apenas aceitam a resolução da decisão e suas consequências. Dessa forma, nesta pesquisa, os atores intervenientes são os representantes das diretorias do DFTRANS e os atores agidos são os usuários do BRT Sul.

Esse método, segundo Villela (2009) se diferencia por considerar vários critérios simultaneamente na análise de uma situação complexa e por incorporar os valores subjetivos dos decisores na avaliação. Portanto, os resultados gerados são vistos como recomendações que atendem aos objetivos e valores dos decisores, e não como solução ótima para o problema.

Ainda segundo Villela (2009) esta técnica pode ser caracterizada como um modelo construído a partir de valores quantitativos que representam numericamente a preferência dos decisores. Ela se resume a um processo de comparação entre dois elementos de cada vez, no qual é preciso fazer uma avaliação qualitativa sobre sua diferença de atratividade. Em seguida, a consistência das respostas é verificada no *software* MAMA Decisão.

Esse modelo, é construído com base em duas etapas: etapa de Estruturação do modelo na qual são identificados os Pontos de Vista Fundamentais, levantados os critérios e subcritérios e definidas as opções a serem avaliadas, e etapa de Avaliação, na qual é feita a mensuração de cada critério através dos níveis de impacto: (5- "Muito Satisfeito", 4- "Satisfeito", 3- "Pouco Satisfeito", 2- "Indiferente" e 1- "Insatisfeito").

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os critérios dentro do método MCDA-C refletem as ações potenciais que foram pensadas pelos decisores. Nesse sentido, é importante avaliá-las junto aos usuários do sistema BRT Sul, que são os agidos no processo, visto que permite captar o modo como eles estão enxergando a facilidade de uso do sistema. Dessa forma, a diretoria do DFTRANS terá subsídios para avaliar essas ações e, conseqüentemente, a qualidade do serviço prestado. Nesse sentido, a avaliação da qualidade do sistema BRT Sul se baseou em cinco grandes critérios: Aprendizado; Eficiência; Memorização; Erros e Satisfação. Assim como em dez subcritérios.

Shackel (1991) entende que aprendizado une a facilidade de compreensão e retenção a médio ou longo prazo das informações pelos clientes (nesse caso, os usuários). Jordan (1993), por sua vez, diz que aprendizagem pode exigir alguma técnica, e mede o custo demandado para se atingir um certo expertise na execução de tarefas.

A avaliação do critério "Aprendizado" apoiou-se em dois subcritérios: Facilidade de Aprendizado e Disposição das Informações. A Figura 1 mostra que esse critério apresentou um resultado final de 13 pontos, isto é, o desempenho das TIC do BRT Sul está muito mais próximo do valor -33, que reflete o nível de desempenho mínimo (TIC Usab Min), do que do valor 141, que reflete o desempenho máximo (TIC Usab Máx). O critério "Aprendizado" foi o melhor avaliado pelos usuários do sistema BRT Sul.

O critério "Eficiência" neste trabalho é conceituado como a combinação ótima dos insumos

(inputs) no processo produtivo de modo que possibilite gerar o máximo de produto (output). Shackel (1991) entende que a eficiência é um atributo da usabilidade e está associado à velocidade e quantidade de erros percebidos durante a interação.

A avaliação do critério “Eficiência” apoiou-se em dois subcritérios: Facilidade de Uso pela 1ª Vez e Facilidade de Uso Esporadicamente. A Figura 2 mostra que esse critério apresentou um resultado final de -3 pontos, isto é, o desempenho das TIC do BRT Sul está mais próximo do valor -37, que reflete o nível de desempenho mínimo (TIC Usab Min), do que do valor 156, que reflete o desempenho máximo (TIC Usab Máx). Esse critério foi também o pior avaliado pelos usuários do sistema BRT Sul.

Nielsen (2003) assinala que memorização é a capacidade de possibilitar a memorização fácil para que um usuário que não trabalhe efetivamente com o programa possa, após um período sem utilizar o mesmo, operá-lo novamente sem dificuldades.

Neste trabalho à avaliação do critério “Memorização” apoiou-se em dois subcritérios: Orientações sobre Horários e Orientações sobre Itinerários. O gráfico da Figura 3 revela que esse critério apresentou um resultado final de 12 pontos, isto é, o desempenho das TIC do BRT Sul está muito mais próximo do valor -42, que reflete o nível de desempenho mínimo (TIC Usab Min), do que do valor 148, que reflete o desempenho máximo (TIC Usab Máx). Sendo o segundo critério melhor avaliado pelos usuários do sistema BRT Sul.

Nielsen (2003) aponta que o critério erros considera a quantidade de problemas que ocorrem no uso sem necessariamente alguma intervenção. Os erros devem ser minimizados o máximo possível, e possibilitar ao usuário a correção de seus erros durante a execução da atividade. Porém, erros graves não podem acontecer.

A avaliação do critério “Erros” apoiou-se em dois subcritérios: Erros Apresentados no Sistema e Ajuda ao Usuário. A Figura 4 aponta que esse critério apresentou um resultado final de 6 pontos, isto é, o desempenho das TIC do BRT Sul está muito mais próximo do valor -36, que reflete o nível de desempenho mínimo (TIC Usab Min), do que do valor 152, que reflete o desempenho máximo (TIC Usab Máx). Correspondendo o terceiro critério pior avaliado pelos usuários do sistema BRT Sul.

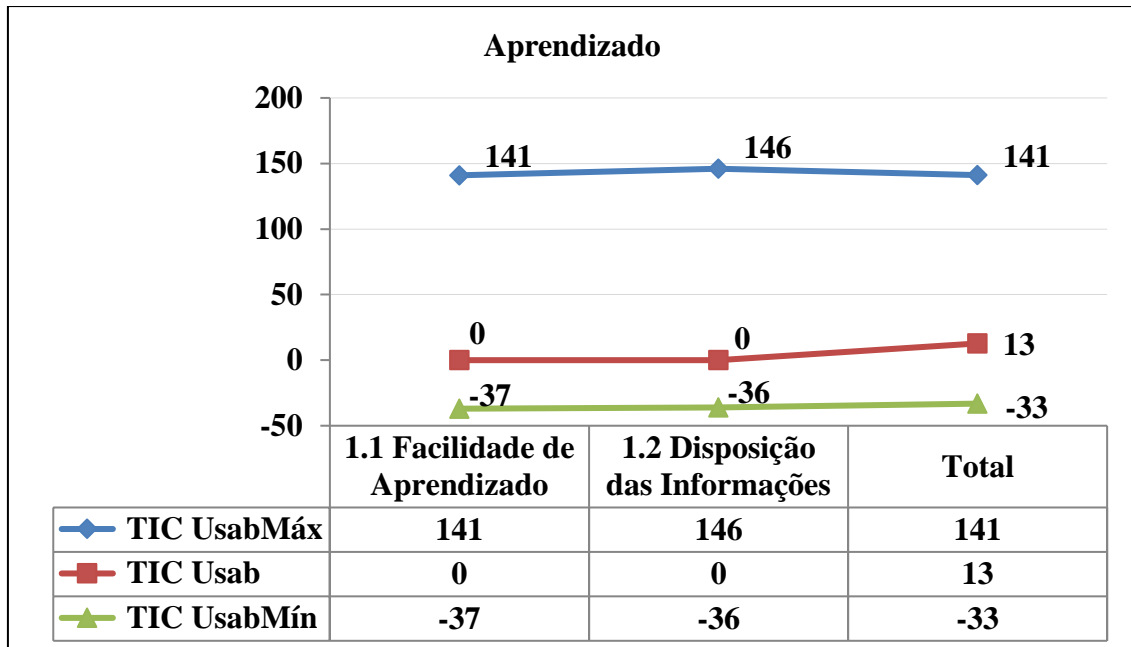


Figura 1. Desempenho do critério “Aprendizado”

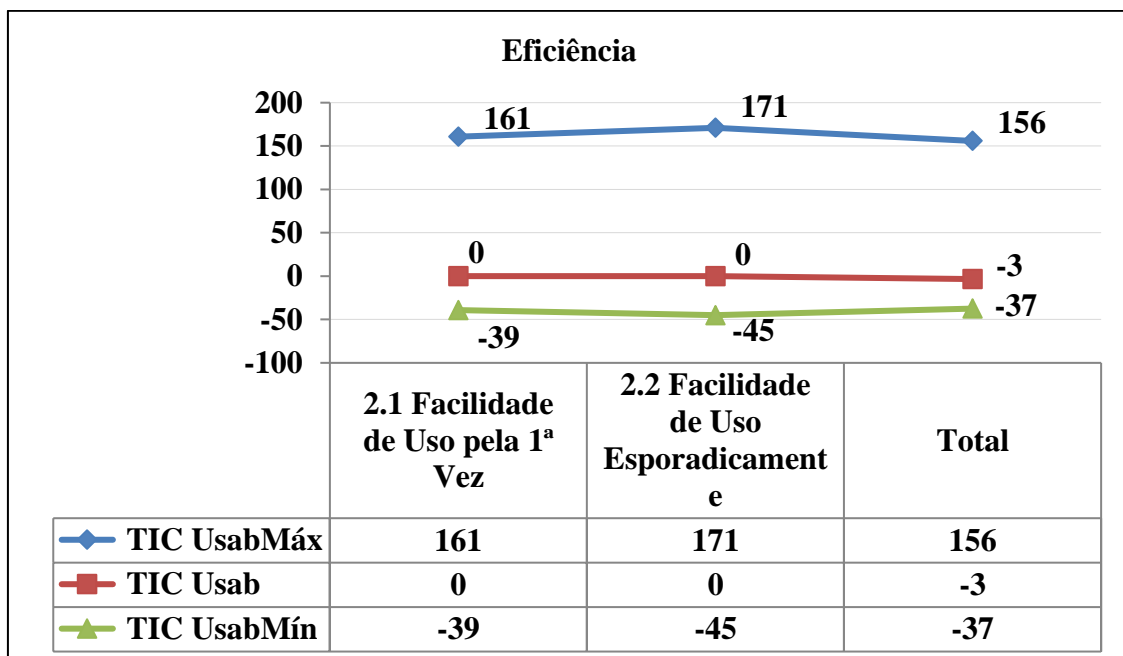


Figura 2. Desempenho do critério “Eficiência”

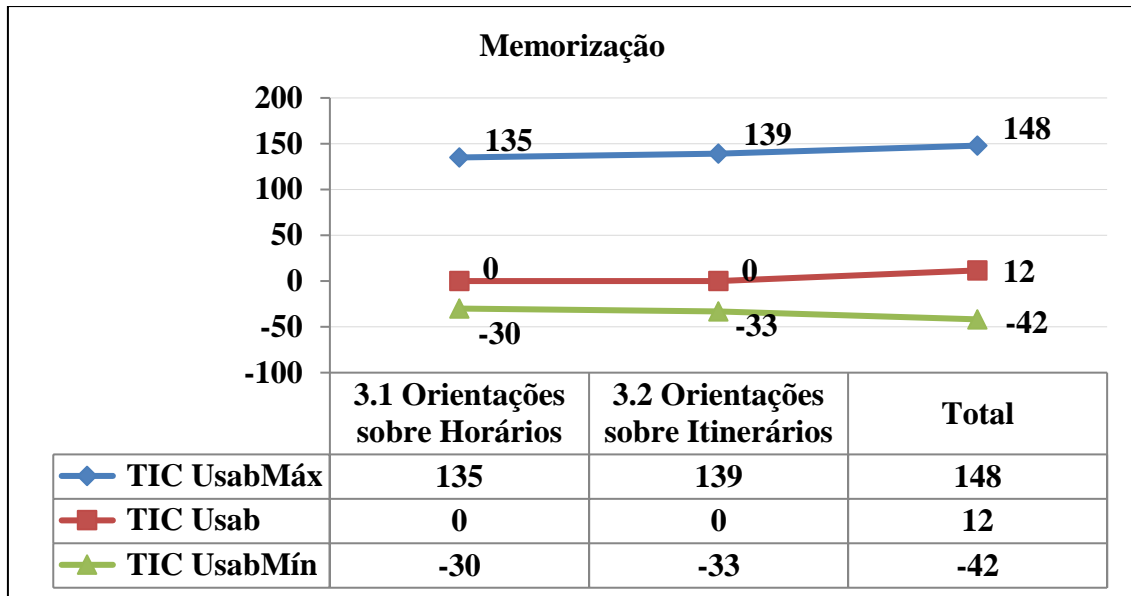


Figura 3. Desempenho do critério “Memorização”

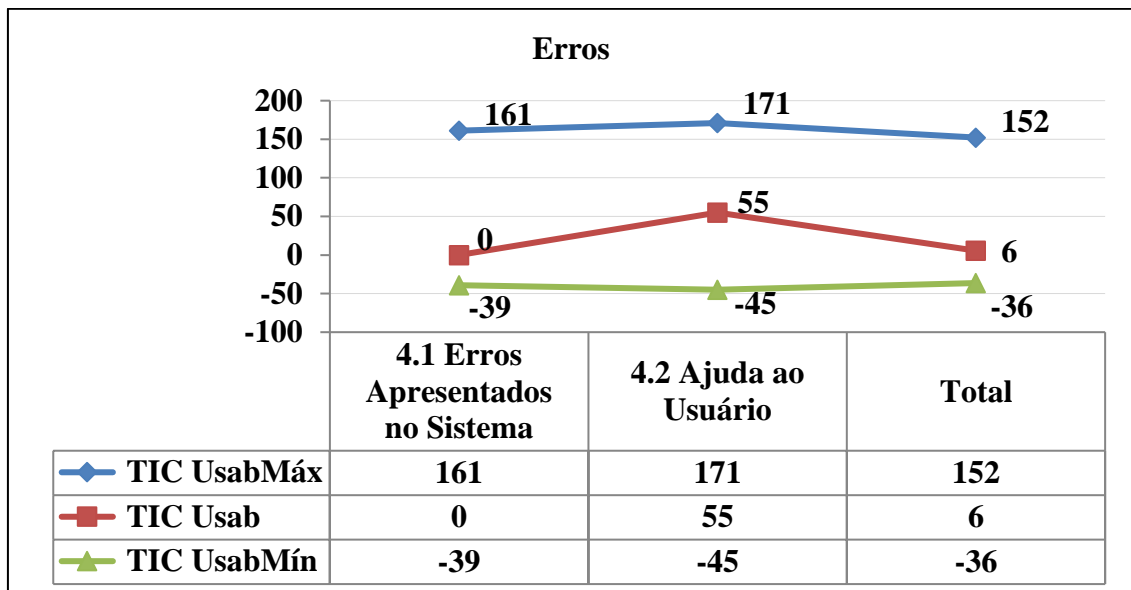


Figura 4. Desempenho do critério “Erros”

Segundo Nielsen (2003), satisfação diz respeito ao sentimento do usuário quanto à agradabilidade do produto. O sistema tem que propiciar o uso agradável e prazeroso do mesmo, garantido a satisfação do operador no seu uso.

A avaliação do critério “Satisfação” apoiou-se em dois subcritérios: Interação Geral e Tempo de Resposta do Sistema. A Figura 5 indica que esse critério apresentou um resultado final de 4 pontos, isto é, o desempenho das TIC do BRT Sul está muito mais próximo do valor -32, que reflete o nível de desempenho mínimo (TIC Usab Mín), do que do valor 136, que reflete o desempenho máximo (TIC Usab Máx). Implicando o segundo critério pior avaliado pelos usuários do sistema BRT Sul.

A avaliação local de todos os critérios e subcritérios apresentados até aqui serviu para fundamentar a análise das TIC na usabilidade do sistema BRT Sul de Brasília/DF. O método MCDA-C permitiu identificar entre as TIC existentes do BRT Sul quais as TIC melhor avaliadas, assim como as TIC que precisam receber maior atenção dos órgãos gestores do transporte público ao mostrar de que modo os usuários têm visto as TIC na usabilidade do BRT Sul.

A Figura 6 apresenta a avaliação global das TIC do BRT Sul e nela pode-se perceber uma avaliação extremamente negativa das TIC ao comparar a pontuação final de apenas 6 pontos com a pontuação de 149 pontos que caracteriza o melhor nível de desempenho que se poderia atingir, ou seja, o resultado final de 6 pontos das TIC do BRT Sul representa que o desempenho ficou 143 pontos abaixo do nível de excelência (TIC Usab Máx).

A Figura 7 mostra que, dentre os cinco critérios avaliados, o critério “Aprendizado” foi o que teve a melhor performance, com uma pontuação de (13). Porém, muito aquém da pontuação máxima (141). Os critérios “Eficiência”, “Memorização”, “Erros” e “Satisfação” obtiveram desempenho, -3, 12, 6 e 4 pontos, respectivamente. A avaliação global mostra que todos os critérios estão muito mais próximos do nível de referência “NEUTRO” que equivale a 0 pontos, - e também caracterizam uma performance ruim -, do que do nível de referência “BOM” que equivale a 100 pontos, e que caracteriza uma performance boa.

Após a análise dos resultados da pesquisa, levantou-se um questionamento em relação ao péssimo desempenho das TIC do sistema BRT Sul, visto que em nenhum momento verificou-se uma pontuação igual ou superior ao nível de referência “BOM” (maior ou igual a 100). Isso mostra que poucos respondentes classificaram os itens como “Satisfeito” ou “Muito Satisfeito” segundo a escala do formulário, e, dessa forma, isso impactou consideravelmente no resultado final da avaliação.

Nessa perspectiva, os usuários-clientes do sistema BRT Sul de Brasília/DF apresentam uma percepção negativa das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) implementadas até esse momento no sistema BRT Sul, visto que essas TIC não apresentam no momento atrativos como aprendizado, eficiência, minimização de erros e satisfação e etc., em relação a outras TIC existentes, por exemplo, nos sistemas metroviários.

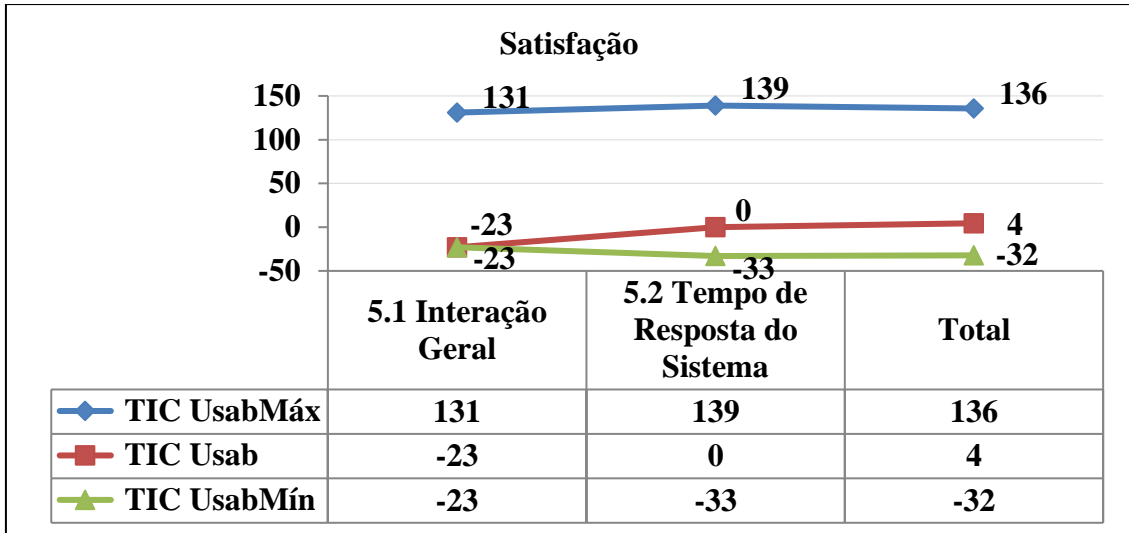


Figura 5. Desempenho do critério “Satisfação”

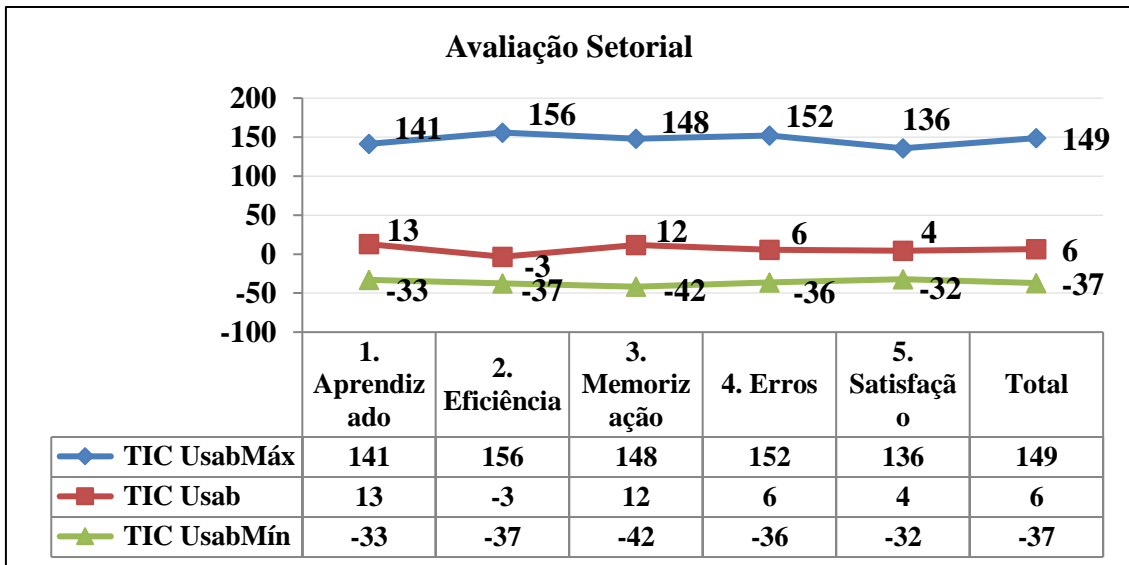


Figura 6. Desempenho das TIC do sistema BRT Sul

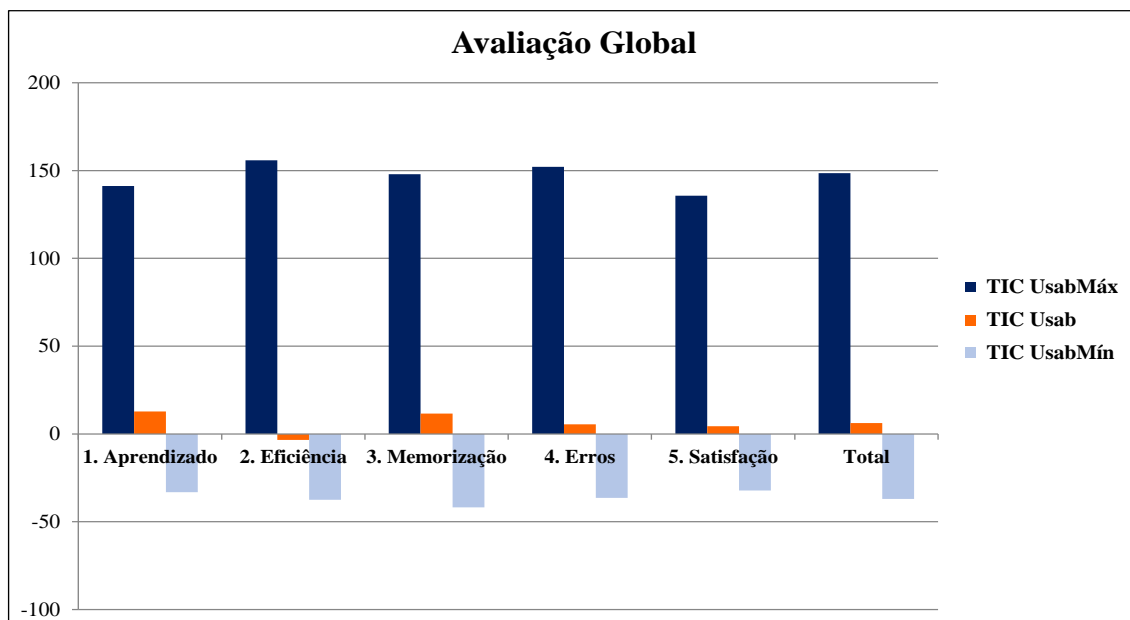


Figura 7. Resultado final da Avaliação Global das TIC do sistema BRT Sul

5. CONCLUSÃO

De modo geral, os resultados desta pesquisa demonstram que as TIC do sistema BRT Sul de Brasília/DF obtiveram uma avaliação bastante negativa pelos usuários, com níveis abaixo das expectativas dos decisores. Dos cinco critérios analisados, “Aprendizado” foi o que teve o melhor desempenho, porém, ficando muito aquém da pontuação máxima. Enquanto os critérios “Eficiência”, “Memorização”, “Erros” e “Satisfação” obtiveram ainda pior desempenho, com a pontuação dos quatro critérios bastante próxima do nível de referência “NEUTRO” que equivale a 0 pontos.

Esse fato pode ser facilmente compreendido em função do sistema BRT Sul de Brasília/DF, que entrou em “operação branca” em 13 junho de 2014 e está em “operação comercial” desde 28 de março de 2015; apesar de ter uma estrutura em si bem executada e disponibilizada para a sociedade, é considerada uma obra inacabada e, para o Tribunal de Contas da União, é também uma obra superfaturada. Por exemplo, das 10 estações construídas, apenas 6 estão funcionando.

De acordo com os estudos de Silva et al., (2015a) e Silva et al., (2015b) e ainda segundo definição de Levinson (2003) e Ministério das Cidades (2008), por não apresentar a combinação de estações, veículos, serviços, vias e principalmente elementos de sistema inteligente de transporte (ITS), esse sistema denominado “BRT Sul” de Brasília/DF não pode ser considerado um *Bus Rapid Transit* (BRT). O referido sistema de transporte público deve ser classificado simplesmente como um corredor exclusivo para ônibus.

O objetivo proposto pela pesquisa foi alcançado no sentido de que foi possível perceber que os usuários ou desconhecem a existência das TIC do sistema “BRT Sul”– fato inusitado –ou

estão muito insatisfeitos com as TIC existentes no referido sistema. Ademais, com base nos resultados apresentados nessa pesquisa, recomenda-se que as TIC – importante componente do Sistema de Informação aos Usuários – precisam receber maior atenção dos órgãos gestores do transporte público, especialmente da SEMOB assim como do DFTRANS.

REFERÊNCIA

- CASTELLS, M. (2003). *A galáxia da internet: reflexões sobre a internet, os negócios e a sociedade*. Trad. Maria Luiza X. de A. Borges, revisão técnica de Paulo Vaz. Rio de Janeiro: J. Zahar.
- CYBIS, W. BETIOL, A. Y FAUST, R. (2010). *Ergonomia e Usabilidade Conhecimentos, Métodos e Aplicações*. São Paulo: Novatec.
- DAHMER, A. Z. Y FLEURY, A. L. (2010). *Road mapping para serviços de tecnologia educacional*. In Eboli, M.; Fischer, A.; Moraes, F.; Amorim, W. Educação Corporativa. Ed. Atlas.
- GIL, A.C. (2010). *Como elaborar Projetos de Pesquisa*. 5ª ed. São Paulo: Atlas S.A.
- JORDAN, P.W. (1993). *First Workshop on Human - Computer Interaction*. Glasgow, UK.
- LEVINSON, H. (2003). *Bus rapid transiton city streets: how does it work?* Second urban street symposium, Anaheim, CA, Estados Unidos.
- MINISTÉRIO DAS CIDADES. (2008). *Manual de BRT - Bus Rapid Transit - Guia de Planejamento*. Brasília: Ministério das Cidades.
- NIELSEN, J. (2003). *230 Tipsand Tricks for a Better Usability Test*. Nielsen Norman Group.
- REBELO, D. (2010). *A relação entre o VT e o transporte público é siamesa: um não vive sem o outro*. Informativo da Associação Nacional das Empresas de Transporte Urbanos, 155, p. 3-7.
- REIS, J. G. M. LIMA, J. O. Y MACHADO, S. T. (2013). *Bus Rapid Transit (BRT) como solução para o transporte público de passageiros na cidade de São Paulo*. INOVAE – Journal of Engineeringand Technology Innovation, São Paulo, v. 1, n. 1, p.83-98.
- RICHARDSON, R. J. e colaboradores. (1999). *Pesquisa Social: métodos e técnicas*. 3ª ed. rev. ampl. São Paulo: Atlas S.A.
- RODRIGUES, E. C. C. (2014). *Metodologia para investigação da percepção das inovações na usabilidade do sistema metroviário: uma abordagem antropotecnológica*. 2014. 262 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.
- SANTOS, A. R. (2000). *Metodologia Científica: a construção do conhecimento*. 3ª ed. Rio de Janeiro. DP & A.
- SANTOS, G. E. O. (2014). *Cálculo amostral: calculadora on-line*. Disponível em: <<http://www.calculoamostral.vai.la>>. Acesso em: 26/11/14.
- SILVA, R. B. FONSECA, PALLAVICINI, A. y RODRIGUES, E. (2015a). *Avaliação da qualidade do sistema BRT/Sul de Brasília/DF segundo a percepção dos usuários*. In: XXIX Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte, 2015, Ouro Preto - MG. Anais do

XXIX Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transporte (ANPET). Rio de Janeiro - RJ: ANPET.

SILVA, R. B., RODRIGUES, E., MAIA, L. I. Y MIRANDA, L. P. S. (2015b). *Análise Multicritério de apoio à decisão: percepção dos usuários do BRT-DF quanto a integração do pagamento do bilhete através do smartphone*. In: XXII Simpósio de Engenharia de Produção, 2015, Bauru - SP. Anais do XXII Simpósio de Engenharia de Produção (SIMPEP). Bauru - SP: UNESP.

SHACKEL, B. (1991). *Usability – context, framework, design and evaluation*. In Shackel, B. and Richardson, S. (eds.). *Human Factors for Informatics Usability*. Cambridge University Press, Cambridge, 21-38.

SORJ, B. (2003). *Brasil@povo.com: a luta contra a desigualdade na sociedade da informação*. Rio de Janeiro, Brasília/DF: J. Zahar, Unesco.

VILLELA, F. R. (2009). *Análise Multicritério para a Definição do Índice de Qualidade de Fornecimento de Energia Elétrica por uma Distribuidora*. 2009. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

5 Los trolebuses y la electromovilidad en la Ciudad de México: ¿evolución o involución?

Francisco G. Alvarado Arias

Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México

RESUMEN

Una creciente preocupación para las ciudades es la reducción de sus emisiones de gases de efecto invernadero producidas por la operación de sus sistemas de transporte.

La solución más conveniente, implica la adopción de la tecnología de tracción eléctrica, pues además de estar exenta de emisiones de bióxido de carbono y partículas contaminantes a la atmósfera, ofrece a sus pasajeros bajos niveles de ruido, vibración y calor; a diferencia de los tradicionales sistemas de tracción de combustión interna.

Mientras que dicha tecnología es la única compatible con los sistemas de transporte de mayor capacidad, como los ferrocarriles urbanos (metro y tranvía), ha sido todavía poco explotada en los sistemas sobre neumáticos.

La Ciudad de México inauguró su servicio de trolebuses (autobuses eléctricos alimentados por línea elevada) en 1951, integrando paulatinamente una amplia red de servicio hacia la década de 1980, para padecer en la actualidad, una drástica reducción de su presencia y cobertura.

Contrariamente a la errónea creencia en México, de que los trolebuses pertenecen a una tecnología anacrónica, anticuada y en desuso, en Europa, por ejemplo, estos sistemas se han conservado, ampliado y modernizado, porque su operación ha demostrado múltiples beneficios técnicos, operativos y ambientales.

Los trolebuses modernos ofrecen un desempeño sobresaliente, óptimo consumo de energía, autonomía mínima de 18 km y variadas configuraciones de piso bajo, en servicios de diferentes rangos de capacidad. Entonces, ¿por qué no han sido contemplados aún dentro de los proyectos de nuevos corredores de transporte público de la Ciudad de México?

Palabras clave: trolebús, electromovilidad, sustentabilidad.

1. INTRODUCCIÓN

Los beneficios que el transporte colectivo de pasajeros proporciona al complejo sistema de actividades y a la calidad de vida de la ciudad, son ampliamente conocidos por todos. Sin embargo, su operación conlleva también efectos no deseados, entre los cuales destaca la emisión de gases de combustión y partículas contaminantes hacia la atmósfera, que contribuyen al deterioro de la salud de las personas y del medio ambiente en general, así como al calentamiento global y cambio climático.

Para las ciudades ambientalmente responsables, la reducción de sus emisiones locales de gases de efecto invernadero (GEI), significa un compromiso ineludible. Para conseguir dicho objetivo, los gobiernos han centrado su interés en la incorporación de nuevas tecnologías para la operación del transporte público. En este contexto, aunque el motor diésel ha ido evolucionando para conseguir la reducción de sus emisiones y su consumo de combustible, queda aún en amplia desventaja ante el funcionamiento del motor eléctrico.

La tecnología de tracción eléctrica sobresale como la única alternativa libre de emisiones de gases de combustión y partículas hacia la atmósfera; con los beneficios adicionales de ofrecer ínfimos niveles de ruido, vibración y calor, simultáneamente con la más alta eficiencia energética. Aunque esta tecnología está intrínsecamente relacionada con los sistemas de transporte urbano de mayor capacidad, como el metro y el tranvía, apenas durante las últimas dos décadas ha resurgido el interés para la propulsión de sistemas de transporte urbano de superficie, de mediana y baja capacidad, bajo el concepto de “electromovilidad”, el cual incluye como indudable protagonista al Trolebús, cuyo nombre original en alemán es “Oberleitungsomnibus”, o su contracción habitual “Obus”.

Este trabajo tiene como objetivo principal, difundir las características tecnológicas que distinguen al trolebús moderno de las demás alternativas de transporte urbano de superficie disponibles comercialmente en la actualidad; haciendo notar que, la reducción de la red y el deterioro de la calidad del servicio de trolebuses de la Ciudad de México, no necesariamente han sido consecuencia de la aplicación de criterios rigurosamente tecnológicos o ambientales.

El funcionamiento de esta red ha sido severamente afectado por la insuficiencia de las inversiones que sostenidamente, durante las dos últimas décadas, se han realizado en el Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal (STE). En contraparte, durante ese mismo periodo, ha aumentado el interés internacional por la implementación de sistemas de trolebuses, básicamente por sus innegables ventajas en términos técnicos, operativos y ambientales; derivadas del notable grado de sofisticación de sus componentes tecnológicos.

2. LA ELECTROMOVILIDAD Y LOS TROLEBUSES

Las innumerables ventajas que ofrece la tracción eléctrica la posicionan como la tendencia indiscutible de la industria del transporte urbano de superficie del futuro, pues a pesar de sus costos de implementación relativamente más altos, éstos están dejando de representar un obstáculo, dados sus beneficios y notables avances tecnológicos.

El concepto de “electromovilidad”, incorpora a todas aquellas tecnologías vehiculares cuya propulsión se consigue por medio de la energía eléctrica, comprende desde ferrocarriles hasta automóviles y vehículos de dos ruedas. Aunque este término resulta aparentemente vanguardista, el autobús eléctrico alimentado por línea elevada (trolebús) no es propiamente una innovación, ya que ha existido desde la década de 1880; de manera que la “electromovilidad”, en realidad surgió en aquella época.

Debido a sus características, el trolebús ha enfrentado a través del tiempo, periodos en los cuales su presencia, cobertura y popularidad como modo de transporte urbano, se han visto influidos por los contextos y/o las tendencias tecnológicas, industriales, sociales, culturales, económicas y políticas particulares de cada época y de cada lugar en cuestión. Al margen de estos elementos, la preocupación generalizada por la reducción de las emisiones contaminantes y en particular, de los GEI, ha sido un argumento irrefutable para que en numerosas ciudades, principalmente europeas, se haya vuelto a considerar al trolebús como una solución efectiva y de alto impacto para mejorar la calidad del aire y la salud del medio ambiente.

En ocasiones, los términos “trolebús” y “autobús eléctrico” (o “electrobús”) producen percepciones diferentes entre los lectores, pudiéndose interpretar arcaico al primero y vanguardista al segundo; cuando bien podría tratarse del mismo vehículo. Para evitar esta confusión, habría que precisar que el trolebús corresponde a la primera generación tecnológica de autobuses eléctricos: los que utilizan dos “troles” (pértigas, astas o postes) que hacen contacto con un sistema de cables de conducción eléctrica suspendidos. En la actualidad, la evolución de la tecnología ha hecho posible que tanto autobuses como tranvías eléctricos, puedan prescindir de dicho sistema de alimentación, parcial o totalmente, a lo largo del recorrido de su ruta.

3. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL TROLEBÚS

3.1 El trolebús y el tranvía eléctrico, concebidos a partir del Elektromote

No es casualidad que el trolebús y el tranvía eléctrico compartan numerosos rasgos tecnológicos, ambos tienen un mismo origen: el “Elektromote” que Ernst Werner von Siemens presentó en un suburbio de Berlín en 1882. Éste fue el primer carruaje de la historia no propulsado por animales de tiro y fue equipado con un par de motores eléctricos, alimentados a través de un cable de conducción eléctrica suspendido (ocurrió 5 años antes

de que Gottlieb Daimler y Karl Benz presentaran el carruaje de combustión interna).

El invento de Siemens fue aprovechado rápidamente por los coches para pasajeros montados sobre vías de ferrocarril, en virtud de que éstas ofrecían condiciones de estabilidad, soporte y seguridad al tránsito superiores que las de los rudimentarios sistemas de pavimentos de aquella época (cuando no existían todavía los neumáticos). Esto permite comprender por qué el tranvía eléctrico, aún resultando más costoso de fabricar que un trolebús, encontró mayores oportunidades para prosperar y conformar una solución viable para atender el problema de la movilidad en las ciudades modernas de los últimos años del siglo XIX.

3.2 El trolebús, como sucesor tecnológico del tranvía eléctrico

Transcurrieron prácticamente dos décadas desde la presentación del Elektromote de Siemens, para que finalmente se estuviera en condiciones de operar comercialmente un vehículo de propulsión eléctrica que no rodara sobre vías de ferrocarril. Este vehículo, que fue mejorado por Max Schiemann y al cual nombró “Oberleitungsomnibus” (“Obus”), permitió la apertura de la primera línea de autobuses eléctricos alimentados por línea aérea de contacto del mundo en 1901, en Bielathal (cerca de Dresde), Alemania.

Con la inclusión de otras mejoras tecnológicas conseguidas durante las dos siguientes décadas (con el surgimiento del automóvil, el autobús de motor de gasolina, los neumáticos y los sistemas modernos de pavimentos), fue posible que alrededor de 1920, el trolebús tuviera reales posibilidades de competir como una alternativa tecnológica ante el tranvía.

La tendencia internacional a partir de esa década, impulsó el reemplazo de las redes de tranvías por las de trolebuses, porque al prescindir de las vías férreas, eran evidentes tres ventajas inmediatas: a) se suprimían los onerosos costos de inversión para habilitar las vías férreas, así como su correspondiente mantenimiento; b) el vehículo estaba en posibilidades de tener un rango de maniobrabilidad más amplio, continuando su marcha aún ante la presencia de obstáculos en su carril de circulación; c) los primeros pasajeros que disfrutaron de esta tecnología, percibieron una mayor calidad de servicio, al ofrecer una marcha más silenciosa y cómoda.

En Estados Unidos, la planta Brill de Philadelphia, comenzó la producción masiva de trolebuses en la década de 1920. En Reino Unido, la British Union Traction (BUT), presentó en 1931 su trolebús de doble piso, facilitando que la autoridad de transporte londinense transformara rápidamente su amplia red de tranvías en una de trolebuses, en cuestión de unos pocos años. En el resto de las naciones europeas, el trolebús igualmente encontró las condiciones ideales para posicionarse como la tecnología de transportación urbana más conveniente de la época, al incorporar las innovaciones tecnológicas conseguidas por otras áreas de la ingeniería.

3.3 El trolebús, después de la década de 1940

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, el nuevo contexto favoreció la difusión masiva del motor de combustión interna, sus menores costos de comercialización y la autonomía garantizada de los autobuses, asociados con el símbolo de modernidad (y en el caso del automóvil particular, de prosperidad), impactaron severamente al desarrollo de la industria del transporte eléctrico en el mundo occidental. Mientras que, para algunos estudiosos, la transición de las redes de tranvías y trolebuses a redes de autobuses fue un proceso conducido por la reducción de los costos de implementación y operación asociados, para otros, influyeron además los intereses de las industrias petrolera y automotriz.

En cualquiera de los casos, el hecho es que a partir de esa época comenzó la cancelación masiva de las principales redes de tranvías de los Estados Unidos, prácticamente desapareciéndolo del entorno urbano; situación que, durante las décadas siguientes, se replicó en otras ciudades alrededor del mundo.

Los sistemas de trolebuses igualmente comenzaron a decaer a nivel mundial partir de esa época, significando que de las casi 400 redes que operaban a mediados de la década de 1950, hacia finales de la década siguiente, quedaban poco menos de 300. Durante esos años, había desaparecido de ciudades como Londres y Madrid, por ejemplo. A pesar de ello, mantuvo una presencia relevante en las naciones de Europa del Este y de la Unión de Repúblicas Socialistas Soviéticas (URSS).

Con el comienzo del nuevo milenio, el trolebús ha vuelto a incrementar su número de redes en operación gracias a su re inserción en ciudades como Roma, por citar al caso más emblemático de aquéllas donde lo han vuelto a implementar, luego de comprobar la significativa brecha tecnológica que hay entre los trolebuses que circulaban hace 50 años y los que actualmente se fabrican en Suiza (HESS), Francia (Irisbus) o Polonia (Solaris), por mencionar solamente a los productores que ofrecen mayor nivel de sofisticación en sus vehículos.

4. EL TROLEBÚS EN EL NUEVO MILENIO

4.1 Sistemas de trolebuses que operan en el mundo

De acuerdo con Alan Murray (2000), en su “World Trolleybus Encyclopedia”, alrededor del mundo se documentó al comienzo del presente milenio, la existencia de 363 redes de trolebuses, atendidas con poco más de 40,000 vehículos en 47 diferentes países. El detalle del número de redes y trolebuses en operación se puede apreciar en la Tabla 1.

El país que mejor ha explotado esta tecnología es Rusia, cuenta con 89 sistemas y 14,110 trolebuses; de los cuales 2,032 proporcionan servicio en la ciudad de Moscú, convirtiéndola de este modo en la red de trolebuses más grande del mundo.

Tabla 1. Redes de trolebuses en el mundo por región geográfica, Año 2000

| | Redes (Sistemas) | Número de Trolebuses |
|-----------------|-------------------------|-----------------------------|
| Este de Europa | 64 | 4,482 |
| Oeste de Europa | 48 | 1,893 |
| Eurasia | 189 | 26,666 |
| Norteamérica | 9 | 1,926 |
| Sudamérica | 13 | 828 |
| Asia | 39 | 4,810 |
| Oceanía | 1 | 60 |
| Totales | 363 | 40,665 |

Al Oeste de Europa, sobresalen por el número de vehículos en operación, las redes habilitadas en Suiza (618 trolebuses en 15 redes), Italia (388 trolebuses en 14 redes), Grecia (350 trolebuses en 2 redes), Francia (199 trolebuses en 6 redes), Austria (131 trolebuses en 4 redes) y Alemania (104 trolebuses en 3 redes), por citar sólo a las más importantes. En esta región, la ciudad con la mayor red en servicio es Atenas, Grecia, al operar 315 trolebuses.

En Norteamérica, de los casi 80 sistemas implementados a lo largo de la historia, escasamente se han mantenido vigentes ocho durante el año 2016: cinco de ellos en Estados Unidos, uno en Canadá y dos en México (Ciudad de México y Guadalajara). La ocurrencia y magnitud de este fenómeno, podría tener relación con los intereses surgidos después de la Segunda Guerra Mundial, conforme se explicó en la sección 3.3 del presente artículo.

En el resto de América, incluyendo el Caribe, esta tecnología se ha implementado en 35 diferentes ciudades; solamente en nueve de ellas se mantiene vigente, a través de 10 sistemas. Las 10 redes se distribuyen de la siguiente manera: tres en Argentina, tres en Brasil (Sao Paulo tiene dos sistemas), dos en Venezuela, una en Ecuador y una en Chile.

4.2 Adquisiciones de nuevos trolebuses en el mundo (2000-2015)

A partir del año 2000, se ha apreciado un renovado interés por la implementación de redes de trolebuses en el mundo: alrededor de 11,555 nuevos trolebuses han sido manufacturados en este periodo (cantidad prácticamente seis veces mayor que la de los autobuses híbridos).

Beijing ha concretado la adquisición de numerosos lotes de trolebuses nuevos, acumulando durante este periodo de 15 años, un total de 648 unidades. Shanghai por su parte, ha adquirido en el mismo lapso, 480. Si a estas cantidades se adicionan los trolebuses adquiridos por Wuhan, Hangzhou, Guangzhou y el resto de las ciudades chinas, se alcanza la nada despreciable cantidad de 1,776 trolebuses; todos ellos, manufacturados en ese país.

Durante el mismo periodo, Moscú adquirió 463 de los 2,186 trolebuses fabricados y comercializados en Rusia. Por citar brevemente otros ejemplos, en Estados Unidos se han comprado 616 unidades; en Canadá, 228; en Suiza, 402; en Francia, 273; y en Brasil, 200.

Por la cantidad de trolebuses nuevos que han sido adquiridos durante este periodo, sobresalen las redes de San Francisco y Seattle, en Estados Unidos; Vancouver, Canadá; Sao Paulo, Brasil; Lyon, Francia y Lausana, Suiza.

5. ATRIBUTOS TECNOLÓGICOS DEL TROLEBÚS MODERNO

5.1 Amplia Variedad de Configuraciones y Capacidades Vehiculares

Estas adquisiciones incluyen trolebuses regulares (aquellos cuyas carrocerías constan de una sola pieza, habitualmente con una longitud entre 11 y 12 m; aunque también los hay de 15 m, montadas sobre chasis de 3 ejes), articulados (construidos mediante dos cuerpos de carrocería, resultando entre 18 y 21 m de longitud) y biarticulados (construidos mediante tres cuerpos de carrocería, para alcanzar hasta los 25 m de longitud); todos ellos con la misma anchura que la de los autobuses convencionales, del orden de los 2.5 m.

Para el mercado europeo, es muy importante el nivel de comodidad ofrecido a los pasajeros por lo cual, suele haber una elevada oferta de asientos, misma que restringe la capacidad del vehículo. Con esta consideración, el trolebús biarticulado, originalmente de manufactura suiza, ofrece la máxima capacidad de transportación de hasta 200 pasajeros. En contraparte, para el mercado latinoamericano, los autobuses diésel biarticulados de 24 m y piso alto que se comercializan en los sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT) en Brasil, Colombia y México, ofrecen una capacidad vehicular típica de 240 pasajeros y recientemente, de hasta 245 pasajeros. Lo cual implica un menor interés en la comodidad del usuario; a cambio del incremento de la capacidad de transportación por vehículo.

La Tabla 2 amplía la información relativa a este particular, mostrando que la capacidad de transportación del vehículo queda definida por los requerimientos del operador del servicio y del tipo de equipamiento incluido. Los valores de referencia para Europa provienen de las fichas técnicas de los trolebuses fabricados por HESS, Solaris y Skoda, principalmente; para el caso Latinoamericano, se indican los valores propuestos por los proveedores industriales y las empresas operadoras del sistema Metrobús de la Ciudad de México.

5.2 Ergonomía y accesibilidad incluyente

Las modernas técnicas de construcción de autobuses han permitido que cualquiera de las configuraciones vehiculares antes descritas, prescindan de escalones para ingresar y/o salir del trolebús. Este vanguardista concepto presenta dos variantes: el “Piso Bajo Integral” (“Low Floor”, LF) y la “Entrada Baja” (“Low Entry”, LE); que proveen condiciones más convenientes para los pasajeros con movilidad restringida (incluidos quienes necesitan sillas de ruedas), al incorporar amplias puertas de servicio, con un nivel de ingreso similar al de la guarnición y acera, emulando el sistema de plataforma de los ferrocarriles urbanos. En cuanto a ergonomía de vanguardia y accesibilidad universal, mención especial merece el trolebús francés Irisbus-Cristallis, del cual se agregará información en el apartado 5.3.2.

Tabla 2. Configuraciones y capacidades vehiculares típicas del trolebús europeo y su equivalencia en la operación del sistema BRT de la Ciudad de México (Metrobús)

| Vehículo de Diseño | Longitud (m) | Servicio Europeo de Trolebuses | | Servicio Latinoamericano de Autobuses | |
|-----------------------|--------------|--------------------------------|----------------------------|---------------------------------------|----------------------------|
| | | Asientos ofertados | Capacidad (pasajeros) | Asientos ofertados | Capacidad (pasajeros) |
| Trolebús Regular | 12 | 36 a 40 | 85 +1 silla de ruedas | 36 a 40 | 100 +1 silla de ruedas |
| Trolebús Regular | 15 | 50 o más | 120 +1 silla de ruedas | 38 | 136 +1 silla de ruedas |
| Trolebús Articulado | 18 | 53 o más | 140 +2 sillas de ruedas | 41 o menos | 165 +2 sillas de ruedas |
| Trolebús Biarticulado | 25 | 60 o más | 200 +2 sillas de ruedas | 49 o menos | 245 +2 sillas de ruedas |

5.3 Electrónica digital de vanguardia en sus sistemas de propulsión

Aunque físicamente ha tenido pocas diferencias a través del tiempo, la verdadera evolución del trolebús radica en la progresiva incorporación de las innovaciones de la electrónica de potencia de control aplicadas en sus sistemas de tracción. Tradicionalmente, los trolebuses han funcionado a lo largo de su historia, con sistemas de corriente directa de 600 V (incluida la red del STE). En los países donde esta tecnología continuó operando, la mayoría de los trolebuses manufacturados durante la década de 1980 aún conservaban esencialmente la misma plataforma tecnológica de 1960: operaban con motores reostáticos.

En 1979 la corporación japonesa Toshiba, conjuntamente con el STE y Mexicana de Autobuses, S.A. (MASA), programaron la fabricación de los primeros trolebuses hechos en México. Este proyecto, contempló el reemplazo de varios componentes eléctricos y mecánicos comunes en los sistemas de tracción de esa época (contactores y relevadores), por dispositivos electrónicos. Este significativo avance, que no había tenido precedente en ninguna otra parte del mundo, confirió a los trolebuses MASA S-500T Serie 4000, un desempeño y confiabilidad superiores a los de sus predecesores, ofreciendo significativos ahorros de energía (cerca del 40%) y permitiendo el perfeccionamiento de los sistemas de propulsión japoneses de nueva generación, basados en circuitos integrados lineales. A esta tecnología, se le denominó Tiristor Convencional o Chopper GTC.

En la primera mitad de la década de 1980, el sistema de Tiristor evolucionó a Apagado por Compuerta, o Chopper GTO. Este sistema, redujo aún más el número de semiconductores e incorporó circuitos integrados digitales. Entre los años de 1980 y 1985, se produjeron más de 420 trolebuses MASA con motorización Toshiba; y hacia 1987, otros 30 más con motorización Mitsubishi.

5.3.1 Sistema de propulsión VVVF-CA con IGBT

El proceso de perfeccionamiento tecnológico de los componentes de control electrónico de potencia de los sistemas japoneses de tracción y frenado de corriente alterna con sistema inversor VVVF (Inversor de Voltaje Variable, Frecuencia Variable) con IGBT (Transistores Bipolares de Compuerta Aislada), en reemplazo de los Transistores Convencionales, estuvo estrechamente relacionado durante aproximadamente dos décadas, con la operación de la red de trolebuses de la Ciudad de México. El resultado final: trolebuses que operan con sistemas de mínimas pérdidas de energía. Bajo estos estándares tecnológicos, excepcionalmente sofisticados en 1995, el STE solicitó la fabricación de los últimos 200 trolebuses nuevos que se incorporaron a su sistema.

Por otra parte, la alta tecnología de los modernos sistemas de propulsión eléctrica europeos ha permitido que las nuevas redes de trolebuses de aquel continente funcionen con corriente directa de 750 V. Este incremento en el voltaje mejora el sistema de línea elevada, haciéndolo más económico, menos perceptible y con menores posibilidades de pérdida de contacto de los troles, aún en las secciones de cambio (empalmes).

5.3.2 Sistema de propulsión del trolebús Irisbus-Cristallis

Este trolebús se caracteriza porque Irisbus, conjuntamente con las también francesas Alstom y Michelin, desarrolló un sistema de propulsión completamente innovador: denominado “Rueda-Motor”. En el eje motriz del vehículo, en vez de utilizar un sistema habitual de cuatro neumáticos (dos en cada extremo), emplea solamente dos (un neumático más uno robusto en cada extremo), que han sido especialmente diseñados para alojar un pequeño motor eléctrico dentro de cada uno de ellos.

El resultado de este excepcional diseño, ha sido un sistema de motorización liviano, silencioso y altamente eficiente en términos energéticos, permitiendo ofrecer el piso bajo integral más amplio y a menor altura del nivel de rodamiento del mercado internacional, sin rampas para homologar el estribo y el nivel de piso interior de tan solo 32 cm, con trolebuses regulares y articulados de 12 y 18 m, respectivamente; imposible de conseguir con los sistemas de transmisión propios de los motores de combustión interna. La versión “Civis” de este trolebús Irisbus-Cristallis, incorpora sensores para el guiado direccional del vehículo, con los cuales incrementa la seguridad de su conducción y mejora su maniobra de aproximación a la guarnición, reduciendo con ello los tiempos de operación.

5.4 Frenado regenerativo y alta eficiencia energética

Gracias a la sofisticación de los sistemas de propulsión con control electrónico digital, los vehículos eléctricos en general, pueden invertir el funcionamiento del motor eléctrico (que convierte la energía eléctrica en energía cinética), para que trabaje también como generador (que convierte la energía cinética en energía eléctrica). Este sistema, llamado “frenado regenerativo”, permite el retorno de energía eléctrica a la línea elevada, para que a su vez sea aprovechada por otros trolebuses, consiguiendo así, un aprovechamiento óptimo de la

energía. Estos sistemas de propulsión ofrecen, una potente pero cómoda aceleración y frenado durante su operación, lo cual se refleja en una calidad de marcha más confortable para los pasajeros durante el viaje, notablemente superior a la de las transmisiones de los autobuses con motor de combustión interna. Esta característica, reduce los niveles de ruido y vibración en el interior del trolebús y contribuye a que éste alcance una prolongada vida útil (de tres a cuatro veces superior a la de los autobuses convencionales).

5.5 Autonomía y flexibilidad operativa

Una de las supuestas debilidades del trolebús, que invariablemente refieren sus detractores, se fundamenta en la creencia de que, si éste se desconecta de la línea elevada, queda imposibilitado para proseguir su marcha hasta que se vuelvan a conectar sus troles; al igual que cuando hay una interrupción en el suministro de corriente eléctrica en los cables. En el presente, esta creencia carece absolutamente de validez pues, así como han evolucionado de manera sobresaliente los sistemas de propulsión, en la misma medida lo han hecho los sistemas de suministro de la energía hacia éstos. Desde los años 1930, existe evidencia de la operación de trolebuses habilitados con un sistema de propulsión secundario, consistente en un pequeño motor diésel; solución que se ha mantenido vigente por décadas y ha evolucionado hacia los sistemas de propulsión secundarios completamente eléctricos.

Los trolebuses modernos, disponen de unidades auxiliares de potencia y de sistemas automáticos para desacoplar y acoplar los troles de la línea elevada. En consecuencia, pueden circular sin estar conectados a los cables, en caso de fallas en el suministro eléctrico, accidentes, invasiones o descomposturas sobre su derecho de vía (incluso, cuando disponga de un carril reservado), manifestaciones o hasta por restricciones de carácter estético en centros históricos de alto valor cultural, como en el caso de Roma.

Gracias a la incorporación de baterías (por lo general del tipo Ion-Litio, aunque también se han instalado con magníficos resultados las de Fosfato de Hierro) y/o supercapacitores, el trolebús moderno puede circular por zonas carentes de tendido eléctrico, en condiciones de carga plena, por distancias de cuando menos 18 km (pudiendo variar, en función de las características del equipo auxiliar suministrado, pues en algunas pruebas en Alemania, se han superado los 30 km).

5.6 Costos de adquisición, operación y mantenimiento reducidos

Los volúmenes de producción de trolebuses registrados durante las últimas dos décadas han permitido que sus costos de fabricación sean relativamente menores que en el pasado, por un fenómeno de economía de escala. Si bien, el trolebús suizo y el francés representan elevados costos de adquisición, esto es comprensible, porque incorporan la mayor cantidad y complejidad de componentes, como: aire acondicionado y calefacción, sistemas electrónicos de apertura y cierre de puertas, compresores más pequeños y silenciosos, sistemas auxiliares de propulsión de alto rendimiento, guiado direccional óptico y particularmente el francés, un revolucionario sistema de propulsión. Así, mientras el costo

aproximado de un Irisbus-Cristallis de 12 m es de 500,000 €; en contraparte, se tienen referencias de trolebuses rusos, chinos y rumanos, con menores niveles de equipamiento, pero más asequibles, como, por ejemplo, el trolebús rumano Amber Vilnis 12AC, para el cual se estima un costo de 225,000 €. Entonces, el trolebús moderno puede resultar tan caro o tan barato, según sean los requerimientos y las expectativas del operador del servicio.

De igual manera, si bien los costos fijos relacionados con la adquisición de subestaciones, la obra civil y el sistema de instalaciones eléctricas pueden significar inversiones cuantiosas; en la medida en que sea mayormente utilizado el sistema, podrían reducirse los costos de operación. Es decir, conforme se oferten frecuencias de servicio mayores, habrá un mejor aprovechamiento de la infraestructura e instalaciones fijas, con el consecuente abatimiento de los costos de operación del servicio. Esto se ha documentado en estudios sobre la estructura de costos de ciertos servicios de trolebuses en Suiza, al comparar servicios proyectados con intervalos de paso de 10 y 5 min, respectivamente. En la Ciudad de México, estos servicios bien podrían ofertar intervalos de paso de 3 o hasta 2 min. Por lo que respecta a los costos de mantenimiento de trolebuses, éstos son bajos, en la medida en que los sistemas de propulsión modernos prácticamente han suprimido los componentes mecánicos, pues como se indicó anteriormente, se han sustituido con electrónica digital.

6. LA ELECTROMOVILIDAD EN MÉXICO

6.1 El tranvía eléctrico de la Ciudad de México

La red de tranvías eléctricos fue inaugurada el 15 de enero de 1900, con la apertura de la ruta México-Tacubaya. En muy pocos años se desarrolló exitosamente esta tecnología (hasta que aparecieron los primeros camiones urbanos en 1917), habilitando 343 km de vías, para integrar una red de servicio de 14 líneas, con las cuales se garantizaba que los pasajeros no tuvieran que caminar más de 300 m en cualquier dirección para poder abordar un tranvía. Comparando las características de aquella red de tranvías, con las de la actual red del Sistema de Transporte Colectivo - Metro (equivalente a 226 km, atendidos con 12 líneas); es posible dimensionar la cobertura y funcionalidad de aquella red tranviaria: ofrecía una cobertura de servicio 50% superior que la que hoy tiene el STC-Metro.

6.2 El trolebús de la Ciudad de México entre las décadas de 1950 y 1980

En la Ciudad de México, el trolebús comenzó operaciones el 9 de marzo de 1951, con la apertura de la línea Tacuba-Calzada de Tlalpan y 20 unidades. Paulatinamente, fue extendiendo su parque vehicular mediante la adquisición de trolebuses, en su inmensa mayoría usados, ante la imposibilidad técnica para fabricarlos en México en esa época, hasta integrar la mayor flota de trolebuses del mundo con esta característica (superando los 800), provenientes de Italia, Canadá y Estados Unidos.

Como se explicó dentro del apartado 5.3, la fabricación de los primeros trolebuses nacionales al comienzo de la década de 1980 tuvo un profundo impacto tecnológico, al reducirse

considerablemente el consumo de electricidad. Pero repercutió también en la funcionalidad de la nueva red de trolebuses proyectada, la cual se detalla en la Tabla 3, porque el “Plan Rector de Vialidad y Transporte” de 1978 y el “Programa de Construcción de Ejes Viales” de 1979, contemplaron la incorporación de grandes lotes de trolebuses nuevos (y con bajos índices de falla), para su operación exclusiva dentro del nuevo sistema de Ejes Viales, cuyo diseño funcional contemplaba frecuencias de paso elevadas (que en el caso de algunos ejes, se planteó con intervalos de 1 min) e incorporó además el concepto de un carril “en contraflujo”.

De este modo, paralelamente a la cancelación definitiva del servicio de tranvías sobre la red de vialidades modernizadas, ocurrió la renovación integral del servicio de trolebuses, que aprovecharía la nueva infraestructura vial con una notable ventaja competitiva: podría enlazar áreas urbanas de manera directa en ambos sentidos de circulación y con un trato preferencial. La premisa para el diseño de los servicios de transporte público de trolebuses en la Ciudad de México se fundamentó en el establecimiento de sitios específicos para las maniobras de ascenso y descenso del pasaje, con lo cual se ejerce estricto control sobre los tiempos de recorrido y se procura una mayor calidad del servicio.

El mayor esplendor del trolebús de la Ciudad de México fue durante la década de 1980, convirtiéndose en la red más grande de Latinoamérica. La Coordinación General de Transporte del D.F., registró que el STE contaba con un parque vehicular de 1,115 trolebuses en 1987 para operar el servicio de 21 líneas en 434.5 km. El mayor número de líneas en operación fue de 30 en 1988, con una extensión total del sistema de 557 km.

6.3 El trolebús de la Ciudad de México durante la década de 1990

En el año de 1990 se incorporaron al servicio 30 trolebuses nuevos, de carrocería MASA con sistema de tracción y frenado de la compañía alemana Kiepe, correspondientes a la Serie 7000. Y el 22 de mayo de 1995, la Dirección General del Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal recibió autorización de su consejo de administración para la adquisición de 200 trolebuses MASA-Mitsubishi, correspondientes a la Serie 9000.

Durante el periodo de octubre de 1996 a agosto de 1997, se elaboró el “Plan Maestro de Trolebuses” pues la red del STE, en términos de su extensión y volumen de pasajeros transportados, era reconocida internacionalmente como la quinta a nivel mundial. La entonces Secretaría de Transportes y Vialidad del Distrito Federal (SETRAVI), estableció dentro del “Programa Integral de Transporte y Vialidad 1995-2000”, que para 1997 se construiría la línea de trolebuses Magdalena Contreras a Cuatro Caminos, haciendo uso del antiguo derecho de vía del ferrocarril México-Cuernavaca, con 55 trolebuses nuevos de alta tecnología. Evidentemente, el proyecto no se concretó y se sustituyó luego por una ciclovía.

Tabla 3. Red de Trolebuses del STE-DF proyectada en la década de 1980

| | Origen | Destino |
|----------------------|----------------------------------|---------------------------------|
| Línea “A” | Central de Autobuses del Norte | Central de Autobuses del Sur |
| Línea “B” | Metro Xola | Metro Tacubaya |
| Línea “C” | I.S.S.S.T.E. Zaragoza | Av. Coyoacán |
| Línea “D” | San Andrés Tetepilco | Metro Mixcoac |
| Línea “E1” | U.H. Vicente Guerrero | Calle Oso (Av. Insurgentes Sur) |
| Línea “E2” | Santa Cruz Meyehualco | Metro Ermita |
| Línea “F” (F1/F2) | Nueva Atzacolco | Ermita Iztapalapa |
| Línea “G” | Metro Aeropuerto | Azcapotzalco |
| Línea “H” | San Juan de Aragón | Metro Aeropuerto |
| Línea “I” | INFONAVIT El Rosario | Metro Chapultepec |
| Línea “J” | Colonia Petrolera | Metro Chapultepec |
| Líneas “K” /“K1” | Culhuacán/San Lorenzo Tezonco | Ciudad Universitaria |
| Línea “L” | Culhuacán | Unidad Independencia |
| Línea “LL” | Metro Indios Verdes | Metro Hidalgo |
| Línea “M” | INFONAVIT Iztacalco | Metro Villa de Cortés |
| Línea “N” | Metro Pantitlán | Colegio Militar (Mar Tirreno) |
| Línea “Ñ” | I.S.S.S.T.E. Zaragoza | Metro Tacubaya |
| Línea “O” | Central de Abastos | Metro San Antonio |
| Línea “P” | Ermita Iztapalapa | Villa Coapa |
| Línea “Q” | Metro Pantitlán | Iztapalapa |
| Línea “R” | Metro Tasqueña | CTM Culhuacán |
| Línea “S” | I.S.S.S.T.E. Zaragoza | Metro Chapultepec |
| Línea “T” | Metro Tasqueña | Tláhuac |
| Línea “U” | Lagunilla | Algarín |
| Línea “V” | Metro San Lázaro | Buenavista |
| Línea “W” | Metro San Lázaro | Balderas |
| Línea “X” | Tláhuac | Milpa Alta |
| Línea “Y” | Metro Balderas | Parque de Los Venados |
| Línea “Z” | Jardín Balbuena | Metro Cuauhtémoc |

6.4 El trolebús de la Ciudad de México en el Nuevo Milenio

La funcionalidad y permanencia del servicio de transporte eléctrico en la Ciudad de México, se ha visto severamente afectado durante la presente década, por el envejecimiento y deterioro generalizado de su parque vehicular. Desde la transición del “Departamento del Distrito Federal (DDF)” al “Gobierno del Distrito Federal (GDF)” ha sido notorio el desinterés de la autoridad local por preservar, modernizar o incrementar la presencia de esta tecnología, luego de causar baja 48 trolebuses que habían cumplido su vida útil en 2012,

apenas se registran 340 trolebuses inventariados (de los cuales, alrededor de 50 se encuentran habitualmente detenidos en los talleres, en espera de refacciones).

Considerando que la última inversión relevante en el STE se llevó a cabo en 1995, para la adquisición de 200 trolebuses nuevos, los cuales se incorporaron al servicio entre 1997 y 1999, preocupa que desde aquella época no se haya vuelto a adquirir un solo trolebús, ni nuevo ni usado, porque bajo los supuestos argumentos de su obsolescencia tecnológica, su inflexibilidad, su dependencia inevitable del cableado eléctrico y sus elevados costos de adquisición, mantenimiento y operación (que han sido abordados durante el desarrollo de esta investigación), el GDF sostenidamente ha reducido su inversión en este sistema, para favorecer a otras tecnologías autodenominadas sustentables, porque ofrecen menores niveles de emisiones contaminantes con respecto de las que comercializaban en el pasado, pero que sin embargo, continúan dependiendo por completo de fuentes fósiles.

El “Programa de Acción Climática de la Ciudad de México 2008-2012”, refiere que, en el año 2000, el sistema de transporte representó aproximadamente el 49% del total de la energía consumida por la ciudad y aportó a su vez, el 37% de las emisiones de GEI. Sin embargo, la construcción de la Línea 2 de Metrobús sobre el Eje 4 Sur durante 2008, significó la cancelación definitiva de la Línea “Ñ”, así como la suspensión temporal y el posterior recorte de la Línea “S”. Al año siguiente, se cancelaron todas las líneas de trolebuses del Eje 3 Oriente, “F”, “F1”, “F2”, “P” y “R”, para que en 2013 se reemplazara la Línea “F2” por la Línea 5 de Metrobús, con idéntico recorrido.

Las acciones del GDF en el nuevo milenio en materia de transporte eléctrico, se han concretado a la formalización de los corredores denominados “Cero Emisiones”. En 2009, se puso en operación el primero de ellos, sobre el desarrollo de la Línea “A” a través del Eje Central Lázaro Cárdenas. Oficialmente, se ha promocionado a este proyecto como el reposicionamiento del transporte eléctrico en la ciudad; pero los 120 trolebuses contemplados para éste, no fueron adquiridos sino sencillamente retirados de otras líneas y rehabilitados en los talleres del STE. El segundo corredor, opera únicamente en la mitad del recorrido original de la Línea “S” de los Ejes 2 y 2A Sur, solamente llega al Metro Velódromo, aunque había el compromiso de propiciar la conectividad modal con Metrobús Línea 2 en UPIICSA. El tercer corredor, corresponde a la Línea “D” de los Ejes 7 y 7A Sur, cuyos carriles reservados son compartidos con bicicletas.

De manera que, durante la última década, la red de trolebuses perdió participación en el reparto modal de los viajes atendidos dentro de la Ciudad de México, por la precaria inversión en el STE. La reducción del tamaño de su parque vehicular, así como sus condiciones de operatividad, explican la drástica reducción del 60% tanto del número de líneas en operación como de la extensión en kilómetros de este servicio durante el periodo de 2006 a 2012, de los 492.61 km de servicio de trolebuses que se proporcionaba a través de 18 líneas en 2006, en la actualidad, se tienen apenas 203.64 km de servicio en las únicas 8

líneas que se mantienen activas: “A”, “D”, “G”, “I”, “K1”, “LL”, “S” y “CP”.

7. CONCLUSIONES

El trolebús moderno es tecnológicamente superior a los autobuses convencionales con motorización diésel, ofrece la misma funcionalidad, flexibilidad y operatividad que éste, pero con una elevada eficiencia energética, que incluye el frenado regenerativo, una calidad de marcha más silenciosa y cómoda, una amplia variedad de configuraciones, capacidades vehiculares, características de equipamiento complementario como sistemas de alimentación auxiliares, con amplios pasillos de piso bajo integral que garantizan una movilidad incluyente y además, exenta de emisiones de bióxido de carbono y partículas contaminantes hacia la atmósfera.

Al igual que un tranvía representa una solución efectiva para el combate a la crisis ambiental dentro de las ciudades, pero con un menor costo de implementación. La controversia en torno a sus costos de adquisición no queda plenamente justificada, si bien los montos para adquirir un trolebús suizo o francés son elevados, los de los rusos, rumanos o chinos, son notablemente inferiores. Los costos de capital para habilitar las subestaciones y el sistema de cableado eléctrico, aunque significativos, tienden a ser mejor aprovechados, en la medida en que las dimensiones de la red y el parque vehicular implementado son mayores; es decir, con líneas de elevada frecuencia de paso es posible tener un mejor aprovechamiento de la infraestructura y conseguir una significativa reducción de los costos de operación (como ha ocurrido con el Corredor Cero Emisiones del Eje Central, que ha concentrado a los trolebuses que operaban de manera dispersa en otras líneas que se cancelaron).

Con 65 años de operación comercial ininterrumpida en la Ciudad de México, lugar donde frecuentemente se registran elevados niveles de contaminación atmosférica, la inclusión del Trolebús en la operación de los nuevos corredores de transporte, de diferentes rangos de capacidad, tradicionalmente atendidos con autobuses diésel de 11, 18 y 24 m, representaría una decisión responsable y congruente con el tema de las acciones globales de mitigación ante el cambio climático y la eficiencia en el consumo de energía. Igualmente, cambiaría la percepción de la población mexicana hacia esta tecnología, algunos la consideran anacrónica, anticuada y en desuso, prácticamente como un servicio de baja capacidad de transportación y exclusivo para adultos mayores; mientras en Europa, como se ha demostrado, esta percepción es completamente diferente.

REFERENCIAS

- ALVAREZ, J., LAZARIN, J., Y GUZMAN, D. (2000). *Cien años de transporte eléctrico en la ciudad de México*. Quinta del Agua Ediciones. México, D.F.
- COMISIÓN DE VIALIDAD Y TRANSPORTE URBANO, COVITUR. (1978). *Plan Rector de Vialidad y Transporte*. DDF.

- COMISIÓN DE VIALIDAD Y TRANSPORTE URBANO, COVITUR. (1979). *Memoria Técnica de los Ejes Viales en la Ciudad de México*. DDF.
- ISLAS, V. (2000). *Llegando tarde al compromiso: la crisis del transporte en la ciudad de México*. El Colegio de México. México, D.F.
- MURRAY, A. (2000). *World Trolleybus Encyclopaedia*. Joint publication of the British Trolleybus Society and Trolleybus Museum Company.
- NAVA, A. Y URRIOLAGOITIA, G. (2007). *Trolebús con motor de corriente alterna*. IPN.
- SECRETARÍA DE TRANSPORTES Y VIALIDAD, SETRAVI. (1997). *Anuario de Transporte y Vialidad de la Ciudad de México*. DDF.
- SECRETARÍA DE TRANSPORTES Y VIALIDAD, SETRAVI. (1997). *Plan Maestro del Transporte Eléctrico 1997-2020*. DDF.
- SECRETARÍA DE TRANSPORTES Y VIALIDAD, SETRAVI. *Programa Integral de Transporte y Vialidad 2007-2012*. GDF.
- VUCHIC, V.R. (2007). *Urban Transit Systems and Technology*. John Wiley & Sons, Inc. Hoboken, New Jersey.

6 Conflitos de regulação entre os serviços de táxis e o Uber no Brasil: disputa de mercado sem foco na qualidade da mobilidade urbana

Laize Andréa de Souza Silva

Maurício Oliveira de Andrade

Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Brasil

RESUMO

Este artigo trata da relação entre carona como uma medida de gerenciamento da demanda de mobilidade urbana e a disputa de mercado existente entre taxistas e empresas de “carona remunerada”. Nos anos 2010, algumas empresas de tecnologia foram fundadas com a finalidade de promover a melhoria da mobilidade urbana por meio de aplicativos de *smartphones*. Dentre elas, a multinacional Uber Technologies Inc. tem causado controvérsias, sendo acusada de provocar concorrência desleal para com a classe dos profissionais taxistas. Nesta pesquisa são analisadas as regulamentações brasileiras referentes ao transporte de passageiros, buscando-se a avaliação das lacunas legais que devem ser preenchidas para a instituição do equilíbrio de mercado entre serviços de táxis e de “caronas remuneradas”. Nessa questão, os processos regulatórios no Brasil, em função de claras dubiedades na interpretação, estão em processo de discussões e reformulações. No entanto, na maioria das manifestações judiciais e legislativas tem prevalecido a proibição do novo modo de deslocamento. Conclui-se que a batalha regulamentar entre os taxistas e o Uber ainda pode se prolongar por tempo indeterminado, e que em meio aos impasses jurídicos, as questões de mobilidade sustentável estão sendo postas em segundo plano.

Palavras-chave: Carona, Táxi, Uber, Regulamentação, Mobilidade.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos tradicionais de planejamento de transportes visam à previsão de demanda e posterior oferta de infraestruturas para o escoamento do fluxo de veículos. Conforme críticas de Herce (2009), tal desenvolvimento gera um ciclo vicioso: a infraestrutura precede o crescimento, o qual requer novo suporte infraestrutural. Sendo o espaço físico inelástico, a construção de redes viárias é limitada, e uma hora o sistema tradicional de planejamento entra em colapso.

Com o foco na circulação de automóveis, esses modelos acabam por excluir a realidade social do espaço urbano, priorizando uma minoria que usa esse modo de transporte, inviabilizando a expansão e a melhoria dos transportes públicos para satisfazer a maior parte

da população (RUBIM e LEITÃO, 2013). Esse processo reflete as condições de imobilidade urbana provenientes dos constantes congestionamentos, além da geração de externalidades (e.g. aumento da emissão de gases poluentes, poluição sonora, etc.).

Com objetivo de reduzir e reverter as consequências desse processo, tem-se desenvolvido modelos alternativos ao tradicional planejamento de transportes, por meio da adoção de diretrizes que garantam a mobilidade sustentável urbana por meio da gestão da demanda de viagens. Dentre as medidas de mitigação dos efeitos do planejamento tradicional de transportes, tem-se o princípio de elevação da taxa de ocupação dos automóveis, o qual pode ser alcançado pela adoção de caronas.

Nesse contexto, nos anos 2010 diversas empresas foram fundadas com a finalidade de promover a melhoria da mobilidade urbana por meio de aplicativos de *smartphones*. Algumas dessas companhias realizam a conexão entre passageiros e motoristas particulares cadastrados em seus sistemas, recebendo uma porcentagem das tarifas cobradas em cada viagem. Apesar de se considerarem empresas de tecnologia e não de transportes, popularmente tais segmentos são acatados como companhias de “carona remunerada”, sendo o termo utilizado para viagens realizadas por mais de uma pessoa por veículo, estando os passageiros sujeitos ao pagamento de uma tarifa.

Juntamente à inovação tecnológica interligada ao transporte, surgiram polêmicas motivadas principalmente pela classe de taxistas, que questionam a legalidade desse tipo de serviço. Em diversos países, eles protestam em busca de uma proteção de mercado, alegando que sistemas de “caronas remuneradas” são geradores de concorrência desleal.

Este artigo visa avaliar, através de análise da legislação brasileira referente ao transporte público individual, as possíveis barreiras regulamentares impeditivas do funcionamento de empresas de tecnologia que conectam passageiros a motoristas particulares. Sendo a *startup* Uber Technologies Inc. a maior do ramo atuante no país, são diagnosticados mais especificamente os empecilhos limitantes da sua operação. Busca-se, a partir de então, a análise das lacunas legais que deveriam ser preenchidas para a instituição do equilíbrio de mercado entre companhias de táxis e de “caronas remuneradas”.

2. CONCEITOS: CARPOOLING E HOV LANES COMO INSTRUMENTOS DE GESTÃO DE DEMANDA DE VIAGENS

No âmbito do transporte, o termo sustentabilidade engloba a necessidade de realizar deslocamento no espaço urbano com o menor gasto de energia e impactos ao meio ambiente possível, dando-se enfoque aos indivíduos. Para tal, diversas diretrizes políticas podem ser adotadas, como por exemplo: melhoria do espaço público para circulação segura de pedestres e ciclistas; uso de faixas exclusivas para veículos de alta ocupação (*high occupancy vehicle* - *HOV*); restrição do uso dos automóveis; instituição de pedágio urbano; e o

compartilhamento de automóveis, que pode ser alcançado por meio de sistemas de carona (denominado *carpooling* ou *ridesharing* em inglês).

Um sistema de caronas possibilita que pelo menos duas pessoas que fariam suas viagens individualmente utilizem um único carro pertencente a um dos ocupantes, alternando ou não a função de dirigir e a divisão de custos, visando aumentar a taxa de ocupação dos automóveis (ICARO, 1999). A priori, esse sistema não se constitui como atividade comercial.

No início do século XX, quando os automóveis começaram a ganhar destaque nas cidades, o compartilhamento de veículos era comum. Viagens realizadas em família ou com vizinhos para diversas atividades (e.g. trabalho, compras e lazer) eram encorajadas pela formação de grupos de caronas. Entretanto, o crescimento da dependência do automóvel e facilidades diversas contribuíram para a redução do compartilhamento (Leman et al., 1994).

Historicamente, os primeiros incentivos políticos à adoção de caronas em viagens pendulares deram-se nos Estados Unidos da América por volta da Segunda Guerra Mundial, devido à escassez de combustíveis e borracha. Após a guerra, *carpooling* deixou de fazer parte das políticas americanas e só retornou a receber atenção em meados da década de 1970, com a crise do petróleo (Ferguson, 1997). Nessa época, nos Estados Unidos, programas voluntários de carona foram encorajados por agências governamentais de todos os níveis com a intenção de reduzir o número de viagens em horário de pico, diminuindo o impacto de novos desenvolvimentos comerciais no sistema de transporte local (Hwang e Giuliano, 1990). No entanto, os incentivos políticos ao compartilhamento de viagens não sobrepuseram a força da popularização do automóvel. Prova disso é que entre as décadas de 1980 e 1990, enquanto a força de trabalho aumentava nos Estados Unidos, o número de viagens diárias por carona decaiu em três milhões, como posto por Leman et al., (1994).

Buscando incentivar o compartilhamento de automóveis, alguns países começaram a adotar faixas de tráfego exclusivas para veículos de alta ocupação (*HOV-lanes*). Nos EUA, essas faixas eram inicialmente exclusivas para ônibus e posteriormente, ainda na década de 1970, foram abertas para *carpools* (Leman et al., 1994). As faixas *HOV* tendem a oferecer maior fluidez de tráfego e, por vezes, isenção do pagamento da tarifa de vias pedagiadas (no caso das *high occupancy toll lanes*). Apesar das visíveis vantagens, pesquisas têm mostrado que a alocação de faixas para *HOV* não são determinantes para a mudança comportamental da demanda, uma vez que diversos fatores exógenos influenciam na escolha do modo de viagem (Dahlgren, 1998; Burris et al., 2014).

Nos últimos anos, diversas pesquisas têm sido realizadas para quebrar barreiras existentes à aceitabilidade da adoção de caronas. Empecilhos psicológicos associados à baixa flexibilidade de horários e a dificuldade de conectar interessados a dar e receber caronas vêm sendo anulados com a formulação de modelos computacionais mais robustos. Esses têm por

finalidade interligar agentes analisando variáveis como janela de tempo aceitável e custo, por exemplo (Galland et al., 2014; Bruglieri et al., 2011; Hartwig, 2007).

3. TECNOLOGIA E “CARONA REMUNERADA”

No início do século XXI, diversos aplicativos para *smartphones* têm sido desenvolvidos com o intuito de fornecer maior comodidade para a vida de seus usuários. Dentre eles, alguns são relacionados à mobilidade urbana. Em meio aos avanços tecnológicos, algumas empresas começaram a fornecer aplicativos de “carona remunerada”, que visam à conexão entre passageiros e motoristas cadastrados nas mesmas. A que mais se destaca entre elas é a multinacional Uber Technologies Inc., que ganhou repercussão internacional quando começou a ter impacto no mercado de transportes locais, afetando principalmente os profissionais taxistas que alegam concorrência desleal por parte da *startup*.

A empresa Uber foi fundada em junho de 2010 em São Francisco, Califórnia, como uma empresa de tecnologia. Inicialmente a *startup* fazia uso apenas de carros de luxo tipo sedan, pelo segmento UberBLACK. Contudo, ultimamente já atua em diversos segmentos e oferece outros produtos mais acessíveis, como o UberX, que utiliza modelos de carros mais simples e preços competitivos. Atualmente, a Uber está instalada em 68 países e não apenas faz uso de automóveis desde os populares aos luxuosos, mas também atua no ramo de aluguel de outros modos, como helicópteros e navios; além de realizar serviços de entrega de mercadorias (UBER, 2015).

O aplicativo funciona de forma simples por auxílio de Sistema de Posicionamento Global (GPS). O passageiro requerente do serviço deve informar o local de partida e o sistema procura o motorista disponível mais próximo para fornecer a “carona remunerada”. Para obter uma estimativa de preço, que pode variar a depender de fatores como trânsito e condições climáticas, o usuário deve informar o seu destino final. O pagamento é realizado pelo próprio aplicativo, sem haver necessidade de transações entre o cliente e o motorista. Ao final, o passageiro avalia sua experiência dando uma nota (de um a cinco, sendo o nível de satisfação crescente) ao serviço recebido (UBER, 2015). Por outro lado, o cliente também é avaliado pelo motorista que lhe presta o serviço (Price, 2015).

Inicialmente, nota-se que a “carona remunerada” não necessariamente atua com o intuito de elevar a taxa de ocupação dos veículos, exceto quando um grupo de pessoas opta por compartilhar uma viagem e dividir a tarifa. Ao invés disso, tal serviço tem o objetivo de conectar passageiros a motoristas particulares. Desse modo, funcionam essencialmente de forma similar a uma usual rede de carros de aluguel com motorista.

3.1 Sobre o Uber e as polêmicas geradas

Apesar de ter se alastrado em grandes proporções pelo mundo e ainda visar expansão, a legalidade do Uber tem sido questionada em diversos países, uma vez que o aplicativo oferta

uma alternativa de deslocamento contestada pelos taxistas, que alegam concorrência desleal. A classe tem realizado protestos ao redor do mundo contra esse sistema de aluguel de veículos, desde 2014. Em muitos lugares, o funcionamento do serviço culminou em disputas judiciais.

A contestação geral é a respeito da ausência de regulação clara para esse tipo de serviço. Taxistas alegam que obedecem a regras de registro e segurança, além do pagamento de licença e impostos, enquanto a *startup* mantém-se livre de tais imposições. Sendo assim, para os motoristas de táxis esse novo sistema constituiria deslealdade de concorrência. A perda de mercado já chegou a ser comprovada pela Agência Municipal de Transportes de São Francisco (SFMTA – *San Francisco Municipal Transportation Agency*, 2014), que apresentou um relatório mostrando queda de 65% do uso do modo táxi no período de janeiro de 2012 a agosto de 2014, sendo a principal causa da redução atribuída as Companhias de Redes de Transportes (TNCs, do inglês *Transportation Network Companies*).

Exemplificando o que tem ocorrido pelo mundo, em maio de 2014, o secretário geral da Licenced Taxi Drivers Association de Londres, Steve McNamara, afirmou que o Uber tem o objetivo de desafiar as legislações que não são compatíveis com seu modelo de negócios (Lee e Kelion, 2014). Os taxistas já realizaram protestos em diversas cidades pelo mundo. O aplicativo já chegou a ser banido de alguns países, como é o caso da Espanha, onde apenas um serviço de entrega de comida pode ser realizado pelo UberEATS em Barcelona (Snedden, 2015); e da Alemanha e Itália, onde o seguimento UberPOP, que utiliza motoristas sem licença comercial, foi proibido por violar as leis nacionais de táxi (Rooney, 2015; Kirchaessner, 2015). Por esse motivo, em algumas cidades, como Berlim, a única forma que a empresa encontrou para continuar funcionando foi através do UberTaxi, que usa carros devidamente licenciados como os táxis (REUTERS, 2014; MILES TO MEMORIES, 2015).

No Brasil, a *startup* começou a atuar pouco antes do início da Copa do Mundo de Futebol da FIFA (*Fédération Internationale de Football Association*), em maio de 2014, visando as cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte e Brasília. Não diferente de outros lugares do mundo, o Uber têm sido assunto polêmico no país e provocado o descontentamento de taxistas brasileiros. Por outro lado, após protesto realizado por taxistas em São Paulo em 8 de abril de 2015, o número de cadastros no aplicativo teve crescimento de cinco vezes em relação à média habitual dos outros dias (BRASIL, 2015a).

Em 2014, a Agência Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) considerou ilegal aplicativos de promoção de transporte sob o pagamento de uma tarifa, incluindo o Uber (Matsuura, 2014; Costa, 2014). No entanto, em 2015 a ANTT, através de sua Superintendência de Transportes de Passageiros, estabelece que cabe aos municípios fazer a regulação da atividade prestada pelo aplicativo Uber, já que a competência legal da ANTT abrange apenas o transporte interestadual. Nessa última situação declara que considera o serviço ilegal por configurar um serviço público e necessitar regulamentação (CÂMARA

DOS DEPUTADOS, 2015).

Conforme informa Alerigi Jr. (2015), a empresa se defende colocando-se a favor da inovação tecnológica para melhoria da mobilidade urbana, acreditando que desse modo as cidades tornar-se-ão mais acessíveis para a população, e que os cidadãos devem ter seu direito de escolha de modo de deslocamento garantido. Ademais, o Uber acredita que as companhias de táxi estão indispostas a competir e já é tempo delas se aperfeiçoarem (Araujo, 2014).

De acordo com o que tem sido evidenciado, o duelo entre os sindicatos de taxistas e a *startup* não está próximo de alcançar um ponto final. O Uber procura lacunas regulamentares para continuar oferecendo seus serviços, enquanto taxistas se sentem prejudicados pelo novo sistema e buscam nas leis a defesa da concorrência. Além disso, é notável a divergência de pensamentos entre diferentes legisladores de cidades distintas, o que torna a análise do problema em território nacional não uniforme.

4. UMA ANÁLISE DO TRANSPORTE INDIVIDUAL DE PASSAGEIROS E A LEGISLAÇÃO BRASILEIRA

Como mencionado anteriormente, o incentivo a programas de carona é uma das medidas que podem proporcionar a facilidade de deslocamento em meios urbanos, tendo como objetivo a mobilidade sustentável. O Brasil possui um breve histórico de estímulo, ainda que de forma sutil, ao transporte por meio de caronas. Ainda em 1991, o Programa Emergencial de Contingenciamento e Racionalização do Uso de Combustíveis, decretado em função da crise do petróleo vivenciada na época, admite como uma de suas diretrizes o estímulo ao transporte solidário de passageiros (BRASIL, 1991a). O transporte solidário é definido como aquele sem fins lucrativos, feito por meio do uso de automóveis ou veículos particulares.

Buscando-se promover o incentivo ao compartilhamento de automóveis privados, poucas leis já foram instituídas e alguns projetos de lei estaduais tramitam pelo país. Em âmbito nacional, tramita na Câmara dos Deputados o Projeto de Lei 8.074 de 2014, que institui a regulamentação do Sistema de Carona Legal (SISCARLEG), objetivando a introdução do transporte solidário no território Brasileiro (BRASIL, 2014a). Apesar de já existirem diversos *websites* e aplicativos móveis que visam conectar pessoas dispostas a oferecer e a pegar caronas (e.g. Tripda, Caronas, Carona Solidária, Carona Brasil, Caronetas e outros), eles são bastante voltados ao transporte interurbano, e ainda há dificuldades da implementação de termos legais que abordem tal assunto. Isso se dá devido ao receio do incentivo ao transporte clandestino em núcleos urbanos, e aos problemas relacionados à segurança questionável desses sistemas.

Tratando-se não mais do transporte solidário, e sim do serviço de “caronas remuneradas”, poucos países fazem uso de instrumentos legais para regular o que seria uma nova forma de deslocamento associado à tecnologia. Pode-se supor que essa situação se deve ao fato dos

aplicativos serem ferramentas de promoção de mobilidade relativamente recentes. No Brasil, por exemplo, é evidenciado um impasse regulamentar para tratar do assunto.

4.1 O transporte público individual e o serviço público

No Brasil, as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU) foram instituídas em 2012 através da Lei Federal 12.587 (BRASIL, 2012). A PNMU aborda a visão mais atual do planejamento de transportes, com foco nos modos não motorizados e no transporte coletivo, além de orientar a regulamentação do sistema como um todo. A lei define o transporte público individual como:

Serviço remunerado de transporte de passageiros aberto ao público, por intermédio de veículos de aluguel, para a realização de viagens individualizadas (Art. 4º, inciso VII).

Ademais, o Art. 12º especifica que:

Os serviços de utilidade pública de transporte individual de passageiros deverão ser organizados, disciplinados e fiscalizados pelo poder público municipal, com base nos requisitos mínimos de segurança, de conforto, de higiene, de qualidade dos serviços e de fixação prévia dos valores máximos das tarifas a serem cobradas.

Dentro dessa categoria de transporte são enquadrados os táxis, um modo de transporte relevante no meio urbano, principalmente quando é levada em consideração a necessidade de deslocamento por pessoas que desconhecem o sistema público de transportes da cidade; ou casos de emergência; ou no período em que os ônibus e/ou metrô deixam de circular. A Lei Federal 12.468 de 2011 (BRASIL, 2011), que regulamenta a profissão de taxista, define em seu Art. 2º que:

É atividade privativa dos profissionais taxistas a utilização de veículo automotor, próprio ou de terceiros, para o transporte público individual remunerado de passageiros, cuja capacidade será de, no máximo, 7 (sete) passageiros.

Definido o serviço de táxi como público, avaliar-se-á como legislação brasileira trata o Serviço Público. A Constituição Federal de 1988 aborda no Art. 175º questões relacionadas aos serviços públicos (BRASIL, 1988):

Incumbe ao poder público, na forma da lei, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, sempre através de licitação, a prestação de serviços públicos. [...]

Para dar suporte ao Art. 175º da CF, a Lei Federal 8.987 foi promulgada em 1995 (BRASIL, 1995a). Seu capítulo II, que trata “do serviço adequado”, determina que para atender as condições apropriadas, o serviço público deve englobar os princípios de “regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e

modicidade das tarifas”.

Confrontando-se tais preceitos com as características do serviço de táxi, algumas contradições podem ser encontradas. Portanto, coloca-se em questão se a atividade prestada pelos profissionais taxistas pode ser enquadrada como Serviço Público, além de apenas um serviço prestado ao público. Alguns juristas consideram os serviços de táxi de natureza privada. Nasser (2014), por exemplo, questiona os princípios da regularidade, uma vez que o serviço é ofertado a depender das condições de demanda de mercado; da modicidade, tendo em vista que é um transporte que não atende a todas as classes sociais devido ao custo não acessível; e da impessoalidade, alegando que serviços de táxi executivos ou turísticos e os com serviços especiais são direcionados a determinado grupo de pessoas. Ademais, o autor questiona a ausência de licitação para permissão ou concessão do serviço que ocorrem em alguns municípios, o que culmina o caracterizando como privado.

Ainda em incongruência as características do Serviço Público, em 2013 foi promulgada a Lei Federal 12.865, que em alteração do Art. 12º da Lei 12.587/2012 permite a transferência de outorga dos serviços de táxi para herdeiros. Ou seja, conforme analisado por Galindo (2012), um bem do Estado passou a ser um patrimônio individual.

O embate “público vs. privado” referente aos serviços de táxi é evidenciado não apenas no Brasil. Na Austrália, por exemplo, o modo é considerado por determinados órgãos governamentais como serviço público e por outros como privado (Taxi Industry Inquiry, 2012). Já em Portugal, táxis são considerados de natureza privada, apesar de associações de taxistas relatarem para que o sistema seja reconhecido como público (Barradas, 2015). Outro ponto de vista é posto no livro *Où vont les taxis*, de Richard Darberá, conforme comentado por Belda (2013), o qual propõe que esse modo de transporte está colocado entre o público coletivo e o individual privado.

Tal ponto de vista não é consolidado na legislação brasileira. De fato, por não estar claramente definido em âmbito nacional se o transporte por táxi se enquadra como um Serviço Público, cada cidade pode tratar o serviço ao seu modo, de acordo com as leis municipais (e.g. alguns municípios adotam o processo de licitação para abertura de novas licenças de táxi e outras não).

4.2 Diferenças entre Uber e táxi tornam a concorrência desleal?

Tratando-se de serviço público, o Art. 3º da Lei Federal 12.468 (BRASIL, 2011) estabelece os requisitos e condições que devem ser atendidas para o funcionamento legal da profissão de taxista. São listados a necessidade de: habilitação para conduzir veículo automotor; cursos de relações humanas, direção defensiva, primeiros socorros, mecânica e elétrica básica de veículos; e veículo com as características exigidas pela autoridade de trânsito; certificação específica para exercer a profissão; inscrição como segurado do Instituto Nacional de Seguridade Social (INSS); e Carteira de Trabalho e Previdência Social (CTPS) para os

taxistas empregados.

Por outro lado, a *startup* Uber determina que é necessário que o motorista possua carteira de habilitação válida e as licenças que são exigidas para dirigir profissionalmente na cidade onde irá atuar, além de ser livre de antecedentes criminais e possuir veículo novo com seguro que cubra o passageiro e o motorista. Antes de tornar-se parceiro da empresa, o motorista deve passar por exames psicológicos (UBER TECHNOLOGIES INC., 2015). Além disso, através das avaliações feitas pelos usuários, o motorista pode ser retirado do sistema se obtiver média inferior a 4,6 pontos, de um máximo de 5,0 (BRASIL, 2015b).

Em adição, enquanto há ausência de regulamentação para determinação de tarifas pagas por usuários dos sistemas de carona, o Art. 8º da Lei Federal 12.468 (BRASIL, 2011) define que municípios com população acima de cinquenta mil habitantes deve fazer uso de taxímetro.

É importante avaliar que apesar da necessidade de uma licença dada pela prefeitura e pagar taxas anuais, os taxistas são isentos do pagamento de certos impostos. As Leis Federais 8.989 (BRASIL, 1995b) e 8.383 (BRASIL, 1991b) isentam o Imposto sobre Produtos Industrializados (IPI) e o Imposto sobre Operações Financeiras (IOF), pagos à Receita Federal, respectivamente na aquisição de veículos. Os profissionais da categoria também ficam isentos do pagamento anual do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA) e do Imposto sobre a Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), de competência dos Estados e Distrito Federal. De acordo com Gonçalves (2011), levando em conta apenas o IPI e ICMS, a compra de um veículo para serviço de táxi chega a ter até 25% de desconto (desconsiderando que algumas concessionárias também oferecem descontos no valor no automóvel).

Desse modo, embora fora do escopo deste artigo, cabe uma avaliação mais detalhada para verificar se as obrigações impostas aos motoristas taxistas não são balanceadas pelo bônus dado na isenção de uma série de impostos. Uma análise econômica bem delineada poderia identificar se o Uber está de fato reproduzindo uma situação de concorrência desleal, ou se a demanda do serviço de “carona remunerada” está migrando de modo de transporte devido à insatisfação referente à baixa qualidade do serviço de táxi.

4.3 O cenário jurídico no Brasil

Em abril de 2015, o juiz de direito Roberto Corcioli Filho chegou a determinar por medida cautelar a suspensão do aplicativo Uber em todo território nacional, decretando que a empresa presta um serviço clandestino (TJSP, 2015a). No mês seguinte à proibição, a juíza Fernanda Gomes Camacho indeferiu a liminar de proibição do Uber, alegando ilegitimidade ativa e falta do interesse de agir, podendo tal decisão ser tomada apenas pelo Ministério Público (TJSP, 2015b).

Em junho de 2015, realizou-se uma sessão de Audiência Pública da Comissão de Viação e

Transporte (Requerimento nº 46/2015), solicitada pelo deputado federal Alfredo Kaefer, para que fosse discutida a questão regulamentar do Uber (BRASIL, 2015a). Daniel Mangabeira, diretor e representante do aplicativo Uber no Brasil, afirmou que o aplicativo promove transporte individual privado (BRASIL, 2015b), apesar de não se considerar um serviço de carona paga ou remunerada (UBER TECHNOLOGIES INC., 2015). Tal defesa foi efusivamente contestada, uma vez que vai de encontro às definições de transporte motorizado privado disposto na Lei Federal 12.587 (BRASIL, 2012), a qual não delinea nenhuma forma de remuneração por esse transporte, ao contrário dos sistemas públicos.

Visando solucionar os embates entre a empresa Uber e a classe de taxistas, cidades brasileiras passaram a formular Projetos de Lei que objetivam a proibição do uso de carros particulares cadastrados em aplicativos móveis para o transporte individual e remunerado de passageiros. O Rio de Janeiro, por exemplo, chegou a ter a Lei Complementar 159/2015 (RIO DE JANEIRO, 2015) aprovada, porém a juíza Mônica Ribeiro Teixeira emitiu uma liminar considerando a proibição do aplicativo inconstitucional, justificando que ela fere o princípio da livre iniciativa. Cidades que não chegaram a ser sede do Uber também já decretaram a proibição da instalação da empresa em seu território, como é o caso de Recife, através da Lei nº 18.176 (RECIFE, 2015).

Em São Paulo, o caso já tem uma abordagem que vai além da proibição. Na cidade, o PL 349/2014 (SÃO PAULO, 2014) foi sancionado pelo prefeito Fernando Haddad, estando proibida a circulação de carros a serviço do Uber na cidade. Entretanto, foi vigorado o Decreto nº 56.489 (SÃO PAULO, 2015) que cria uma nova categoria de táxis, denominada Táxi Preto, com a liberação de um número limite de alvarás. A nova modalidade visa à melhoria do padrão dos veículos, a permissão do uso de meios eletrônicos para prestação do serviço e a fixação do valor máximo permitido para cobrança de tarifa. Caso a *startup* aspire continuar funcionando na cidade, deverá se adequar à nova regulamentação, obtendo uma licença para a nova classe.

Apesar de ser evidente a falta de uniformidade legislativa entre as cidades brasileiras, o que tem ocorrido em São Paulo pode servir de exemplo para municípios distintos. Associar o novo modo a um sistema de táxi ainda pode ser incerto e discutível. Porém, a restrição do número de licenças deve ser considerada benéfica, uma vez que freia o crescimento do sistema, pondo um limite ao número de automóveis prestadores do serviço em circulação.

5. CONCLUSÃO

Diversas medidas podem ser adotadas para a promoção da mobilidade urbana sustentável. Porém, elas devem ser postas em prática de modo a garantir a segurança e a conveniência dos cidadãos que têm necessidade de realizar deslocamentos para a prática de diversas atividades. Assim, é importante que o Estado proveja regulamentações que assegurem o bom funcionamento dos sistemas de transportes em prol da população.

Em meio ao problema de imobilidade urbana e à facilidade crescente de acesso à tecnologia por meio de telefones celulares, pode-se considerar natural o surgimento de empresas que utilizem tal recurso para suprir as necessidades de deslocamento de uma parcela da população. Contudo, serviços que usam aplicativos móveis para conectar passageiros e motoristas privados acabam por gerar dúvidas quando se questiona uma legislação obsoleta, tratando-se de avanços tecnológicos. Desse modo, uma das principais dificuldades é entender em que categoria se encontra esse tipo de serviço dentro da legislação brasileira vigente para superar os impasses que se apresentam.

No Brasil, apesar da defesa do transporte solidário para melhoria da mobilidade, é difícil enquadrar o novo modelo de sistema de transporte em uma das categorias já existentes. Por essa razão, o serviço prestado pelo Uber tem sido um grande gerador de polêmicas e debates. O fornecimento de atividade remunerada de transporte de passageiros não pode ser simplesmente considerado dentro do segmento privado, apesar do diretor do Uber no Brasil, Daniel Mangabeira, ter admitido que a empresa é posta em funcionamento por meio do transporte individual privado.

Por outro lado, caso enquadradas na categoria de transporte público individual, as empresas de “caronas remuneradas” devem ser organizadas, disciplinadas e fiscalizadas pelo poder público municipal, conforme proposto pela Lei Federal 12.587 (BRASIL, 2012). Portanto, é fundamental que sejam definidas não apenas diretrizes para a operação de *startups* como o Uber, mas que seja realizada fiscalização efetiva de modo a garantir que os motoristas sejam profissionais qualificados e façam uso de veículos regularizados. Assim, barreiras referentes à falta de segurança seriam quebradas.

Em contrapartida, por ser uma atividade que provem da inovação tecnológica, companhias de “caronas remuneradas” poderiam ser legalmente enquadradas em uma classe de transportes a parte, como as TNCs são na Califórnia, EUA. Contudo, também é preciso que os serviços de táxi sejam melhor enquadrados em uma natureza jurídica, tendo-se em vista que atualmente existe um arcabouço legal que os coloca como Serviço Público, ao mesmo tempo em que concede direitos inerentes da prestação de serviço privado. Entretanto, de um modo ou de outro, é extremamente necessária a criação de diretrizes que assegurem o equilíbrio de mercado, de modo que a classe taxista não seja prejudicada por concorrência desleal. Seria a solução a criação de uma nova modalidade de táxi como foi feito em São Paulo, ou uma categoria desvinculada do conceito de táxi seria mais adequado?

Assim, como colocado no Requerimento nº 46/2015, ainda é preciso determinar em que categoria jurídica encontra-se o Uber, além de definir a quem cabe a criação de regras para o funcionamento da empresa no Brasil (BRASIL, 2015a). A *startup* certamente não abrirá mão do mercado brasileiro e a proibição definitiva de sua operação no país reduz o número de opções de deslocamento ofertadas para a população que necessita realizar conexões dentro do espaço urbano. Se existe uma demanda que dá preferência ao novo modo ofertado,

pode significar que ele cobre alguma falha do sistema existente. Desse modo, é necessário que, o quanto antes, fomentem-se regras direcionadas a atuação do Uber e aplicativos similares no Brasil, juntamente à realização de intensa fiscalização, para assim preservar a justa concorrência e garantir a segurança dos usuários.

Dentro da visão de transportes, a busca da mobilidade sustentável está sendo irrelevante em meio aos impasses jurídicos. O que muito se tem visto é uma proteção de interesses econômicos individuais, ao invés da adoção de medidas para melhoria da qualidade de deslocamento no espaço urbano objetivando o bem coletivo. De certo modo, a intenção principal da carona tem sido desvirtuada, uma vez que o objetivo principal dos aplicativos de *smartphones* (tanto os utilizados para chamada de táxi, quanto os de “carona remunerada”) não é elevar a taxa de ocupação dos veículos para que o volume de automóveis em circulação seja reduzido. Por sinal, em meio à crise econômica, a busca por alternativas de acréscimo de renda pode gerar o aumento de motoristas interessados em fazer parte do Uber, culminando no aumento de automóveis em circulação, como ocorreu em Nova York após a crise de 1929.

Devido à obtenção de *status* social ainda está bastante associada ao modo de deslocamento, o compartilhamento de automóveis é cercado de barreiras culturais e psicológicas. Portanto, necessita-se que políticas urbanas mais eficazes promovam a quebra de paradigmas, a fim de proporcionar redução do volume de tráfego de veículos privados e melhorar a interrelação de todos meios de transporte. Além disso, é interessante que se estudem as características da demanda existente para os serviços de “carona remunerada”, uma vez que há possibilidade de seus usuários estarem migrando de meios de transportes mais eficientes em termos de mobilidade urbana, porém, de pior qualidade efetiva.

REFERÊNCIAS

- ALERIGI JR., A. (2015). *Justiça de SP determina suspensão de serviços do Uber no Brasil*. Reuters Brasil, 29 abr. 2015. Disponível em: <<http://br.reuters.com/article/internetNews/idBRKBN0NK1IJ20150429>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- ARAÚJO, B. (2014). *Uber quer mudar lei sobre transporte no Brasil, diz executivo do aplicativo*. Portal de notícias G1, 10 out. 2014. Disponível em: <<http://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2014/09/uber-quer-mudar-lei-sobre-transporte-no-brasil-diz-executivo-do-aplicativo.html>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- BARRADAS, P. (2015). *Transporte público ou privado? Eis a falsa questão dos táxis*. Expresso, 26 mai. 2015. Disponível em: <http://expresso.sapo.pt/blogues/bloguet_economia/blogue_econ_paulo_barradas/2015-05-26-Transporte-publico-ou-privado--Eis-a-falsa-questao-dos-taxis>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- BELDA, R. (2013). *O futuro dos taxis como transporte público urbano*. Associação

- Nacional de Transportes Públicos – ANTP, 09 sep. 2013. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/website/noticias/ponto-de-vista/show.asp?npgCode=A02DD658-24F3-44FE-8230-348CF00D503C>>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- BRASIL (1988). *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- BRASIL (1991a). *Decreto de 17 de Janeiro de 1991*. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 18 jan. 1991, Seção 1, p. 1336.
- BRASIL (1991b). *Lei nº 8.383 de 30 de Dezembro de 1991*. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 31 dez. 1991, Seção 1, p. 31138.
- BRASIL (1995a). *Lei nº 8.987, de 13 de Fevereiro de 1995*. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 14 fev. 1995, Seção 1, p. 1917.
- BRASIL (1995b). *Lei nº 8.989, de 24 de Fevereiro de 1995*. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 25 fev. 1995, Seção 1, p. 2653.
- BRASIL (2011). *Lei nº 12.468, de 26 de Agosto de 2011*. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 26 ago. 2011, Seção 1, p. 1.
- BRASIL (2012). *Lei nº 12.587, de 3 de Janeiro de 2012*. Diário Oficial da União, Poder Legislativo, Brasília, DF, 4 jan. 2012, Seção 1, p. 1.
- BRASIL (2014a). Câmara dos Deputados. *Projeto de Lei nº 8.074/2014*. Institui o "Sistema de Carona Legal" em âmbito nacional e dá outras providências, Brasília.
- BRASIL (2015a). Câmara dos Deputados. *Requerimento nº 46/2015* – Deputado Alfredo Kaefer. Comissão de Viação e Transportes.
- BRASIL (2015b). Câmara dos Deputados. *Arquivo sonoro: Comissão de Viação e Transportes – Audiência pública. Requerimento nº 46/2015*. Disponível em: <<http://imagem.camara.gov.br/internet/audio/Resultado.asp?txtCodigo=52923>>. Acesso em: 19 jun. 2015.
- BRUGLIERI, M., CICCARELLI, D., COLORNIA, A., LUÈ, A. (2011). *PoliUniPool: a carpooling system for universities*. Procedia Social and Behavioral Sciences, v. 20, p. 558-567. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187704281101442X>>. Acesso em: 09 jun. 2015.
- BURRIS, M.; ALEMAZKOOR, N.; BENZ, R. E WOOD, N.S. (2014). *The impact of HOT lanes on carpools*. Research in Transportation Economics, v. 44, p. 43-51. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885914000055>>. Acesso em: 05 jul. 2015.
- CÂMARA DOS DEPUTADOS (2015). *Regulação da Uber deve ser feita por municípios, afirma ANTT*. Câmara Notícias – Transporte e Transito, 18 jun., 2015. Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/camaranoticias/noticias/TRANSPORTE-E-TRANSPITO/490558-REGULACAO-DA-UBER-DEVE-SER-FEITA-POR-MUNICIPIOS,-AFIRMA-ANTT.html>> Acesso em: 21 dez. 2015.
- COSTA, R. (2014). *“Carona paga” é ilegal, diz agência reguladora sobre app Uber*. JusBrasil, jul. 2014. Disponível em: <<http://rafaelcosta.jusbrasil.com.br/noticias/125367904/carona-paga-e-ilegal-diz-agencia-reguladora-sobre-app-uber>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

- DAHLGREN, J. (1998). *High Occupancy Vehicle Lanes: Not always more effective than general-purpose lanes*. Transportation Research Part A, v. 32, nº 2, p. 99-114.
- FERGUSON, E. (1997). *The rise and fall of the American carpool: 1970-1990*. Transportation, v. 24, p. 349-376.
- GALINDO, R.W. (2012). *Sérgio Buarque sabia das coisas*. Gazeta do Povo, 03 jun. 2012. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/vida-publica/colunistas/caixa-zero/sergio-buarque-sabia-das-coisas-20hnn33kft2cjl936110xgoy6>>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- GALLAND, S., KNAPEN, L., YASAR, A., GAUD, N., JANSSENS, D., LAMOTTE, O., KOUKAM, A., WETS, G. (2014). *Multi-agent simulation of individual mobility behaviour in carpooling*. Transportation Research Part C, v. 45, p. 83-98. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0968090X14000035>>. Acesso em: 09 jun. 2015.
- GONÇALVES, M. (2011). *Cartas de Isenção: você sabe o que é preciso?* Revista Táxi, 03 nov., 2011. Disponível em: <<http://revistataxi.com.br/pages/modArt.php?modId=409>> Acesso em: 23 nov. 2015.
- HARTWIG, S. (2007). *Empty Seats Traveling – Next Generation Ridesharing and Its Potential to Mitigate Traffic and Emission Problems in the 21st Century*. NOKIA – Research Center.
- HERCE, M.V. (2009). *Sobre la movilidad en la ciudad*. Barcelona: Reverté, D. L.
- HWANG, K., GIULIANO, G. (1990). *The Determinants of Ridesharing: Literature Review*. Working Paper. University of Southern California, Los Angeles.
- ICARO (1999). *Increase of car occupancy through innovative measures and technical instruments*. Final Report, Zurique, Suíça.
- KIRCHGAESSNER, S. (2015). *Uber ordered to discontinue Pop service in Italy*. The Guardian (UK edition), 25 mai. 2015. Disponível em: <<http://www.theguardian.com/technology/2015/may/26/uber-pop-italy-order-discontinue-unfair-competition-taxi>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- LEE, D., KELION, L. (2014). *London black taxis plan congestion chaos to block Uber*. BBC News, 8 mai. 2014. Disponível em: <<http://www.bbc.com/news/technology-27317164>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- LEMAN, C.K., SCHILLER, P.L., PAULY, K. (1994). *Re-thinking HOV – High Occupancy Vehicle facilities and the public interest*. A report by Chesapeake Bay Foundation. Annapolis. Disponível em: <<http://trid.trb.org/view.aspx?id=665905>>. Acesso em: 13 jul. 2015.
- MATSUURA, S. (2014). *Sem regras claras, aplicativo Uber enfrenta os tribunais*. O Globo, 17 dez. 2014. Disponível em: <<http://oglobo.globo.com/sociedade/tecnologia/sem-regras-claras-aplicativo-uber-enfrenta-os-tribunais-14852339>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- MILES TO MEMORIES (2015). *What is UberTaxi, Why it is Pointless & My Recent Experience in Berlin*. Miles to Memories, 27 aug. 2015. <<http://milestomemories.boardingarea.com/uber-taxi-berlin-review/>> Acesso em: 24 nov. 2015.

- NASSER, A. (2014). *Os serviços de táxi, sua natureza jurídica e a necessidade de ajustes terminológicos da legislação ao respectivo fenômeno – caso do Rio de Janeiro*. Jus Navigandi, jan. 2014. Disponível em: <<http://jus.com.br/artigos/26567/os-servicos-de-taxi-sua-natureza-juridica-e-a-necessidade-de-ajustes-terminologicos-da-legislacao-ao-respectivo-fenomeno-caso-do-rio-de-janeiro/2>>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- PRICE, R. (2015). *The incredibly simple way to find your 'secret' Uber passenger rating*. Business Insider UK, 11 de fev., 2015. Disponível em: <<http://uk.businessinsider.com/uber-passenger-rating-how-to-customer-stars-how-do-i-2015-2>> Acesso em: 23 nov. 2015.
- RECIFE (2015). *Dispõe sobre a operação, administração ou uso de software aplicativo destinado à oferta, contratação ou intermediação de serviço individual de transporte de passageiro no município do Recife, Recife*. Assembleia Legislativa. Lei nº 18.176/2015.
- REUTERS (2014). *Uber to use regular taxi drivers in Germany*. Reuters, 29 set. 2014. Frankfurt. Disponível em: <<http://www.reuters.com/article/2014/09/29/uber-germany-taxi-idUSL6N0RU35P20140929>> Acesso em: 24 nov. 2015.
- RIO DE JANEIRO (2015). *Regulamenta o serviço público de transporte individual remunerado de passageiros em veículo automotor, a profissão de taxista e dá outras providências, Rio de Janeiro*. Assembleia Legislativa. Lei Complementar 159/2015.
- ROONEY, B. (2015). *UberPOP banned in Germany*. CNNMoney (Nova York), 18 mar. 2015. Disponível em: <http://money.cnn.com/2015/03/18/news/uber-ban-germany/index.html?iid=HP_LN>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- RUBIM, B., LEITÃO, S. (2013). *Plano de Mobilidade Urbana e o futuro das cidades*. Estudos Avançados, v. 27, n. 79, p. 55-66. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v27n79/v27n79a05.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2015.
- SÃO PAULO (2014). *Dispõe no âmbito do município de São Paulo sobre a proibição do uso de carros particulares cadastrados em aplicativos para o transporte remunerado individual de pessoas e dá outras providências, São Paulo*. Assembleia Legislativa. Projeto de Lei nº 349/2014.
- SÃO PAULO (2015). *Institui a categoria táxi preto no sistema de transporte individual remunerado de passageiros, autoriza a emissão de novos alvarás de estacionamento e regulamenta a sua transferência, São Paulo*. Assembleia Legislativa. Decreto nº 56.489/2015.
- SAN FRANCISCO MUNICIPAL TRANSPORTATION AGENCY, SFMTA (2014). *Taxis and Accessible Services Division: Status of Taxi Industry*.
- SNEDDEN, M. (2015). *The questionable legality of Uber in 11 places around the world*. Road Warrior Voices, 12 abr. 2015. Disponível em: <<http://roadwarriorvoices.com/2015/04/12/the-questionable-legality-of-uber-in-11-places-around-the-world/>>. Acesso em: 15 jun. 2015.
- TAXI INDUSTRY INQUIRY (2012). *Customers first: service, safety, choice*. Draft report, May 2012. Impact digital. Disponível em: <http://www.taxi.vic.gov.au/__data/assets/pdf_file/0005/118877/Taxi-Industry-Inquiry-Draft-report.pdf>. Acesso em: 25 jun. 2015.
- TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ESTADO DE SÃO PAULO, TJSP (2015a). *Decisão de*

Mandato, Cautela Inominada – Liminar. 12^a vara cível, Processo nº 1040391-49.2015.8.26.0100. Juiz de Direito: Roberto Luiz Corcioli Filho. São Paulo, 28 abr. 2015. TRIBUNAL DE JUSTIÇA DO ESTADO DE SÃO PAULO, TJSP (2015b). *Sentença, Cautela Inominada – Liminar, 19^a vara cível*. Processo nº 1040391-49.2015.8.26.0100. Juíza de Direito: Fernanda Gomes Camacho. São Paulo, 4 mai. 2015.

UBER (2015). *Website*. Disponível em: <<https://www.uber.com>>. Acesso em: 10 set. 2015.

UBER TECHNOLOGIES INC. (2015). *Fatos e dados sobre a Uber*. Newsroom (Belo Horizonte), 14 jan. 2015. Disponível em: <<http://newsroom.uber.com/belo-horizonte/pt/2015/01/fatos-e-dados-sobre-a-uber/>>. Acesso em: 15 jun. 2015.

7 Mobilidade, um termo a dissecar

Henrique Eduardo Araújo Coelho

Rogério Faria D'Avila

Universidade Federal de Minas Gerais

RESUMO

O presente artigo lança luz à complexa discussão que a disciplina de transportes tem absorvido com a abrangência de conceitos que o termo mobilidade carrega junto consigo, principalmente quando se incrementa a dimensão da sustentabilidade. A metodologia do trabalho foi fundamentada na busca de referências que tratassem a questão da mobilidade em diversos contextos disciplinares, que podem ter abordagens importantes no tratamento das políticas de mobilidade. O enfoque foi dado à realidade brasileira, principalmente tratando do contexto urbano de grandes cidades. O artigo apresenta algumas práticas transdisciplinares e multidisciplinares e suas respectivas repercussões positivas, e, ao final, faz um convite aos investigadores que discutem a mobilidade a contribuírem com pesquisas que impactem positivamente a gestão da mobilidade, através de um olhar multifacetado.

Palavras chave: Mobilidade, transdisciplinaridade, multidisciplinaridade.

1. INTRODUÇÃO

Em 2012 foi promulgada a Lei Federal nº 12.587, que institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana no Brasil. O termo mobilidade é um tema desgastado que permite uma divagação conceitual, assim como outra palavra constante na lei como um de seus objetivos, a sustentabilidade. Como Monte-Mór afirma:

“... é preciso re-significar velhos conceitos se queremos explorar algumas das transições epistemológicas e ontológicas necessárias para se avançar na compreensão das mudanças que vemos acontecer no mundo contemporâneo” (Monte-Mór et al., 2015).

A Lei 12.587 define mobilidade urbana como: “condição em que se realizam os deslocamentos de pessoas e cargas no espaço urbano” (BRASIL, 2012). Se por um lado a definição proposta é restritiva, em outro ponto de vista a lei é extremamente vaga na definição de políticas que de fato favorecerão a desejada mobilidade urbana.

Simultaneamente vem surgindo o conceito de mobilidade sustentável, e para não utilizar esse título em vão deve-se respeitar os três pilares fundamentais da sustentabilidade, promovendo o equilíbrio entre os aspectos: ambientais, sociais e econômicos. Tradicionalmente, a

disciplina de transportes já tem a premissa econômica em suas raízes; a preocupação com os aspectos ambientais vem se expandindo cada vez mais com as ameaças de aquecimento global e demais prejuízos ao ecossistema. Porém considera-se aqui que a dimensão social permanece no “limbo”, pois há uma dificuldade de seu controle através de dados e estatísticas, o que gera grande incômodo para grande parte dos profissionais envolvidos na disciplina de transportes. As abordagens sociais geralmente estão vinculadas a indicadores econômicos, como renda e emprego, que possuem fácil correlação com pesquisas quantitativas. Mas há diversas questões qualitativas que precisam ganhar mais espaço nos campos de discussão, para posteriormente obter maior efetividade na prática.

Dessa forma, em uma busca por um maior equilíbrio dos pilares da sustentabilidade, este trabalho tem como intuito explorar significações da palavra mobilidade no contexto urbano, democrático e local, ampliando sua abordagem na dimensão social e cultural. Para alcançar esse objetivo, é necessário enxergar para além das questões técnicas e das táticas óbvias e previsíveis, há de se mergulhar sobre questões sociais, políticas, econômicas e antropológicas. A metodologia do trabalho visava abraçar à multidisciplinaridade, mas sua infinitude limitou este estudo a uma exposição de nove tópicos (3 ao 11) que sintetizam referências e conteúdos que lançam diferentes perspectivas ao tema da mobilidade. Após a explanação dos nove tópicos, o artigo apresenta experiências positivas de estudos ou práticas que extrapolam os limites disciplinares do campo de transportes. O fechamento do artigo estabelece uma crítica ao discurso da mobilidade que pode contribuir com o estímulo de novas investigações.

2. CONTEXTUALIZAÇÃO

Aproximadamente nos anos 2000, o termo mobilidade urbana passou a ser adotado no Brasil com o intuito de estabelecer novos paradigmas sobre o setor de transportes, inspirado no uso dessa terminologia pelos europeus. Até então, transporte e trânsito eram os termos dominantes no campo teórico do setor; dessa forma houve também uma vertente que defendeu que a mudança de paradigma acontecesse através da qualificação do conceito de transporte, como transporte humano e transporte sustentável. Outros especialistas ainda acreditavam que a apropriação de um novo conceito não seria capaz de gerar avanços nos complexos processos envolvidos (Amaral, 2015). Essa constatação de incompletude do termo mobilidade é uma das motivações para o presente texto, ao entender que muitas vezes o setor trabalha sobre o tema em um campo de visão restrito:

“os engenheiros resistem aos enfoques sociais e políticos porque eles acreditam, por sua formação, que os assuntos de transporte e trânsito são exclusividade dos técnicos.” (TOWN, 1981, *apud* Amaral, 2015 p. 56).

3. MOBILIDADE SOCIAL

No contexto da mobilidade social, mover-se não necessariamente remete a um deslocamento geométrico no espaço, pois um indivíduo pode, por exemplo, ascender ou descender socialmente através de uma mudança em sua condição financeira, sem obrigatoriamente se locomover no espaço físico (Lemos, 2011). O ponto de partida deste texto se dar pelo exemplo da mobilidade social é intencional no sentido apontar o rompimento de um paradigma: a mobilidade não necessariamente se dá através do deslocamento de pessoas no espaço, o que encaminha para a discussão apresentada no próximo tópico.

4. NÃO TRANSPORTE

Em 1989, no VII Congresso Brasileiro de Transporte Público, foi apresentado o artigo intitulado “Não transporte: a reconquista do espaço tempo social” (ANTP, 1989).

O conceito de não transporte surge do entendimento que a política de promoção do acesso às atividades distribuídas pelo espaço, não deve partir exclusivamente da criação de alternativas de transporte, por isso deve-se romper o ciclo infinito de investimentos em transporte e por os “pés no chão”. A cidade é comumente erodida na medida em que o transporte avança, como já pontuava, desde a década de 1960, a jornalista/ativista/urbanista Jacobs:

“Atualmente todos os que prezam as cidades estão incomodados com os automóveis. As artérias viárias, junto com os estacionamentos, postos de gasolina e *drive-ins*, são instrumentos de destruição urbana poderosos e persistentes. Para lhes dar lugar, ruas são destruídas e transformadas em espaços imprecisos, sem sentido e vazios para qualquer pessoa à pé. Os centros urbanos e outros bairros que são maravilhas de complexidade compacta e sólido apoio mútuo acabam displicentemente desentranhados. Os pontos de referência são aniquilados ou tão deslocados de seu contexto na vida urbana que se tornam trivialidades irrelevantes. A feição urbana é desfigurada a ponto de todos os lugares se parecerem com qualquer outro, resultando em Lugar Algum.” (Jacobs, 2011).

O não transporte é uma corrente que protesta por maior atenção ao organismo da cidade, principalmente as metrópoles; há diversas propostas que consideram a redução de deslocamentos ao invés de ampliar a oferta de transporte, permitindo outros pontos de vista sobre a questão da mobilidade urbana.

5. ACESSIBILIDADE

A proposta do não transporte enxerga que mais importante que a mobilidade é a acessibilidade. As constatações Amaral (2015) sobre estes termos seguem a ordem de que a

movilidade guarda a simples relação física e econômica com o ato de movimentar-se no espaço, enquanto acessibilidade é mais abrangente, envolvendo a questão das necessidades de deslocamentos das pessoas.

Uma interpretação possível da relação entre acessibilidade e mobilidade é:

“entender a acessibilidade como o que as pessoas querem e a mobilidade como o que as pessoas conseguem, ou seja, a utilização do conceito de acessibilidade parece ampliar a liberdade das pessoas em seus deslocamentos” (Amaral, 2015).

A acessibilidade, nesse sentido, assume um papel de inclusão, pois permite a transposição de fronteiras, que no conceito de Augé (2010) podem ser fronteiras físicas ou sociológicas.

6. TRAVESSIA

Na engenharia, o termo tráfego é dado como uma característica do fluxo de pessoas e objetos (sobretudo através de veículos) que pode ser caracterizada e dimensionada, dessa forma se pode quantificar o tráfego e mensurar no espaço e no tempo a sua capacidade, que pode ser definida como: máximo fluxo que pode normalmente atravessar uma seção em condições existentes de tráfego, geometria e controle, num dado período.

De forma a extrapolar esse conceito para além da definição deste como ferramenta técnica-prática para o setor de transportes, buscou-se outros contextos, e uma aplicação interessante encontrada foi através da leitura de Lefebvre:

“Muito estranhamente, o direito à natureza (ao campo e à “natureza pura”) entrou para a prática social há alguns anos em favor dos lazeres. Caminhou através de vituperações, que se tornaram banais, contra o barulho, a fadiga, o universo “concentracionista” das cidades (enquanto a cidade apodrece ou explode). Estranho percurso, dizemos: a natureza entra para o valor de troca e para a mercadoria; é comprada e vendida. Os lazeres comercializados, industrializados, organizados institucionalmente, destroem essa “naturalidade” da qual as pessoas se ocupam a fim de traficá-la e trafegar por ela.” (Lefebvre, 2011)

Trafegar, na tradução, pode também ter o sentido de usufruir, o que remete ao conceito de Rosa sobre a travessia: “o real não está na saída nem na chegada: ele se dispõe para a gente é no meio da travessia.” (Rosa, 1994). A literatura, neste caso, sugere que “o real”, ou seja, o importante, não está na origem ou no destino, mas na travessia, na busca de um propósito, que conseqüente muda de acordo com os novos acontecimentos cotidianos, que são ricos em possibilidades.

Logo, o processo de artificialização do mundo, evidenciado na última citação de Lefebvre, resume mobilidade à velocidade e eficiência, o que transforma o espaço em um “não-lugar” (Augé, 2004). Enquanto isso, algumas (contra) racionalidades evidenciam que é possível articular uma realidade em que o espaço da rua pode ser rico em possibilidades de uso e ocupação, e ao mesmo tempo a cidade ser dotada de mobilidade, como no caso de Copenhague, na Dinamarca:

“Igualmente já foi sinalizado que o tráfego tende a desenvolver simultaneamente à construção de novas estradas, até a presente data, todas as experiências relativas às atividades humanas realizadas nas cidades e próximas das áreas residenciais parecem indicar que ali onde se cria um marco físico de qualidade, as atividades exteriores tendem a crescer em número, duração e alcance.” (Gehl, 2006).

7. NOMADISMO E FIXAÇÃO

O surgimento da cidade acontece quando os nômades estacionam, ou seja, se fixam em determinado espaço (Jacobs, 1969). Desde esse momento até a evolução das civilizações, houve um processo de confluência, promovendo uma homogeneização das formas de nossa espécie ocupar o espaço. Para Lemos, esse processo maquiou a essência nômade do homem:

“O nomadismo seria mesmo a característica essencial da nossa espécie. Os processos civilizatórios e industrial nada mais são do que formas de controle social, com o intuito de barrar e disciplinar o errante, o vagabundo, o flâneur – figuras vistas como disfuncionais à sociedade racionalista e disciplinar. Para Attali, o processo civilizatório institui processos de territorialização, enquadrando e monitorando a vida social através de uma rede de regras, instituições, leis, artefatos. O próprio da vida social é o deslocamento, o nomadismo e a errância.” (Lemos, 2011).

De acordo com Maffesoli (2001), o homem pós-moderno está tomado pela errância, evidente nas constantes migrações de trabalho, do consumo, nas migrações sazonais do turismo e das viagens e ainda nas migrações induzidas por desigualdades econômicas.

Porém, esse nomadismo contemporâneo é, em certa medida, geograficamente estático. E o fato que possibilitou ou induziu esse processo desencadeou na especialização imobiliária.

8. IMÓVEL, ESPECIALIZAÇÃO IMOBILIÁRIA E INACESSIBILIDADE

A composição do vocábulo *imóvel* não coincidentemente tem relação com o termo mobilidade. O sentido que dá o prefixo *i* (negação do sentido original da palavra) surge quando a ocupação humana do espaço perde seu caráter nômade (móvel) e passa a se caracterizar pela fixação. Imóvel, nesse sentido, passa também a ter o significado de um bem que não é móvel: nasce a propriedade.

É válido uma nota de Paixão & Abramo, que trata a questão da fixação residencial na contemporaneidade do contexto brasileiro:

“O espaço urbano é estruturado a partir do desejo das famílias de usufruírem externalidades de vizinhança, tendo nas características socioeconômicas dos moradores de uma localização o parâmetro norteador de sua escolha. Os empreendedores urbanos oferecem as moradias às famílias e tentam controlar esse mercado por meio da inovação espacial. Essa coordenação, porém, dá-se no nível cognitivo, sendo sujeita a falhas e mudanças repentinas.” (Paixão & Abramo, 2008)

Surgem questionamentos sobre a questão imobiliária, através da leitura de OBSERVATORIO METROPOLITANO (2014) e aplicação à realidade brasileira. A especialização imobiliária e a financeirização do espaço urbano induz a um ciclo favorável ao mercado e desfavorável ao cidadão.

De forma geral, as opções de trabalho e demais oportunidades estão concentradas no território, o que gera uma força de atração aos centros urbanos, o que induz ao indivíduo a sua instalação, e de sua família, em um raio minimamente viável para os deslocamentos diários em função do trabalho e das necessidades da família.

Porém, a propriedade privada é uma barreira que restringe o acesso aos cidadãos e às famílias que dependem do trabalho e do acesso à moradia próximo dos centros de oportunidade. Os preços de aluguel ou de venda de imóveis tendem a diminuir conforme se estende o raio que distancia do centro (condição comum mas não é regra); dessa forma, o mercado organiza pelo território a distribuição das populações no espaço urbano, em função de suas condições socioeconômicas, acarretando no processo de periferização pobre. A tendência da procura naturalmente seria extremamente concentrada nas localidades mais oportunas, mas a barreira financeira induz a existência também de demandas periféricas.

Nesse contexto pergunta-se: Qual situação surge primeiro para um indivíduo ou família? A escolha (ou oportunidade) ao trabalho ou a escolha (oportunidade) de moradia?

Acredita-se que há uma heterogeneidade de respostas, mas independente da ordem desses acontecimentos, uma situação depende da outra, ou seja, a escolha da residência pode motivar o trabalho ou o trabalho pode motivar a escolha de residência. Ou ainda, a necessidade do trabalho determina o local de residência, ou o local onde o indivíduo reside determina as possibilidades de trabalho.

Dessa forma gera-se um ciclo em que o trabalho demanda uma fixação (em função dos deslocamentos diários) e a fixação decorrente do trabalho demanda o próprio trabalho (em função das despesas decorrentes da moradia naquela localização). Esse fato acarreta em um mercado imobiliário infinito baseado no trabalho e na especialização do trabalho.

Para as pessoas que possuem estabilidade no emprego talvez não haja a necessidade de se preocupar em adquirir um imóvel, uma vez que supostamente os ganhos fixos e estáveis são capazes de sustentar a moradia por aluguel. Mas a grande maioria dos brasileiros, que não possuem essa estabilidade de trabalho, enxerga o sentido em obter a casa própria, mas quase sempre essa opção encaminha para o endividamento.

Essa gama de necessidades (ou demanda) sustenta o mercado imobiliário, que obtém ganhos do trabalho que envolve esse setor, mas também retém o ônus (sobrelucro) advindo do processo de urbanização do território, que, por sua vez, advém da especialização do trabalho.

Esse processo direciona para um endividamento crescente da população e poder público, enquanto a iniciativa privada (que detém os meios de produção do espaço) multiplica seus ganhos de forma desproporcional.

Essa lógica evidencia a evolução do mercado imobiliário, que “brinca” com a localização das populações. Por trás desse contexto da disposição urbana pode-se considerar que grande parte dos deslocamentos, sobretudo as viagens de maiores distâncias (periferia-centro), são demandas que existem devido à inacessibilidade à moradia nos centros urbanos, gerada pela barreira imobiliária supracitada. Ou seja, a mobilidade (os transportes), neste caso, ao mesmo tempo em que rompe as fronteiras do espaço social segregado, também o legitima.

Simultaneamente a esse processo, existem vários imóveis vazios nos centros urbanos que não cumprem a função social da propriedade determinada pela Constituição Federal de 1988. Se a política urbana municipal aplicar a legislação federal que permite a pressão sobre imóveis vazios, poderia-se praticar o aluguel social nestes imóveis atualmente inutilizados, impactando inclusive no cenário da mobilidade urbana, diminuindo os deslocamentos periferia-centro.

9. PERCEPÇÃO/INTERESSE DOMINANTE X VIVÊNCIA COTIDIANA

Retomando a discussão do tópico anterior, o capital, representado nesta abordagem pelo mercado imobiliário, etimologicamente tem o “poder” como uma possível interpretação. O poder corporativo pode interferir na esfera política e também na esfera técnica, de acordo com seus interesses, exercendo sua dominância.

O universo da política ainda pode gerar mais ruídos nos processos de tomada de decisão. Dessa forma, a percepção ou o interesse dominante muitas vezes não enxerga ou ignora as demandas de quem convive diariamente com os problemas urbanos. Um exemplo é o caso da Rocinha, favela do Rio de Janeiro, que tem como prioridade o investimento em saneamento, mas o poder público decidiu passar na frente a construção de um teleférico. Houve diversas manifestações (por parte dos moradores) contrárias ao teleférico, clamando pela urgência de investimentos em saneamento, mas o apelo popular foi em vão. Muitos

manifestantes argumentam que o teleférico trará maior visibilidade ao status de cidade criativa que o Rio quer alcançar, aproveitando principalmente os “holofotes” dos Jogos Olímpicos de 2016. Enquanto a intervenção proposta promete melhorar a mobilidade da favela, há manifestos de que o teleférico prioritariamente serviria para movimentar o turismo, privilegiando os turistas em detrimento aos moradores.

Mesmo não levando em conta os interesses locais, uma intervenção “moderna e criativa” pode chamar atenção para sua publicidade, passando a impressão de que o poder público cumpriu brilhantemente com o seu papel. Isso muitas vezes depende do processo de comunicação pelo qual a informação passa.

10. INFORMAÇÃO, CONEXÕES E SIGNIFICADOS A PARTIR DO ENCONTRO

“...por mais que as novas tecnologias sejam sofisticadas e permitam ações a distância, ela é sempre locativa. As mídias produzem sentido de lugar. Criam formas de conhecimento e de experiência local, já que nossa percepção do mundo e de nós mesmos se dá pela relação com o outro e com a imagem que esse outro cria de nós. Essa é a tese de Mead (1967) sobre os “outros significativos” (significant others)” (Lemos, 2011).

A conexão se dá de forma muito semelhante entre transportes e informação. O transporte liga dois pontos no espaço, e a informação só se completa quando uma mensagem produzida chega ao seu receptor (através das diversas mídias possíveis sempre há um ponto de origem e um ou mais pontos de destino). As conexões geram significados, desde a perspectiva biológica (em que os neurônios e o sistema nervoso se encarregam do processo cognitivo) até a perspectiva macrocósmica; ou seja, geram significado para o mundo.

Atualmente é comum ouvir as pessoas reclamando do trânsito, do transporte e, em última análise, do seu tempo de deslocamento. Pode-se dizer que um indivíduo considera o deslocamento como algo residual, pelo gasto de um tempo sem utilidade.

Assumindo isso, pode-se fazer uma analogia com o conceito de espaço-lixo de Koolhaas (2010): “...é o que resta depois da modernização seguir o seu curso, ou mais concretamente o que se coagula enquanto a modernização está em marcha, o seu resíduo.” (Koolhaas, 2010). O espaço-lixo é apreendido a partir da visão ampla da cidade que passa a ser negada e descaracterizada com a implantação da “arquitetura da modernidade” (shoppings, supermercados, aeroportos etc.). A cidade se transforma gradativamente em algo que está entre o ponto de origem e o ponto de destino, e no processo de urbanização ostensiva e de metropolização, assim como o deslocamento, tende a se tornar residual.

Sob essa análise é importante retomar significações para o deslocamento e para o espaço urbano, pois comumente, na atualidade, a dimensão humana do reconhecimento tem se

perdido, Kehl sugere a substituição da indiferença pelo interesse:

“O homem urbano é o homem comum. Para viver com ele de maneira minimamente solidária é preciso reconhecer que somos, todos nós, tão comuns quanto ele. Só assim, em minha banalidade pedestre, estarei disponível para perceber que tudo o que diz respeito a ele também diz respeito a mim. Os que preferem circular blindados dizem que a vida nas ruas é violenta. Discordo. Andar nas ruas, de preferência a pé, é um modo de evitar que o medo, cujo principal fundamento é a fantasia, nos torne violentos. Andar nas ruas nos faz ver os outros de frente, de perto – às vezes, olho no olho. O que pode parecer clichê é, na verdade, condição de convívio: é necessário olhar nos olhos dos outros” (Kehl, 2015).

Assim, através do encontro e olhando nos olhos dos outros, são estabelecidos as conexões e os significados da vida urbana.

11. ABSTRAÇÃO ABRANGENTE X DOMINIO LOCAL

Peixoto critica o ponto de vista “global” que se dá através das perspectivas aéreas (Google Earth), que aparentemente, por serem mais abrangentes, poderiam mostrar as dinâmicas mais complexas do território. A engenharia utiliza deste e de outros métodos que Peixoto atribuiria como dispositivos tecnológicos que engessam os processos analíticos. Interpreta-se que o aparato de tecnologia e da técnica muitas vezes se prende às suas possibilidades, excluindo um leque de oportunidades.

Peixoto ainda deixa a pista de que “o ponto de vista localizado, do solo, individual, seria um contraponto à visão dominante, propiciando uma percepção mais próxima da experiência, da história, das práticas sociais” (Peixoto, 2011).

Esse ponto de vista “global” descrito pelo autor também pode ser encarado como um processo de colonização do olhar sobre as cidades, sobre os territórios e sobre o mundo. Dessa forma, se faz necessário descolonizar o olhar e ver o mundo com os próprios olhos (Santos, 2006), o que remete ao domínio da escala local.

12. PRÁTICA TRANSDISCIPLINAR E MULTIDISCIPLINAR: REPERCUSSÕES POSITIVAS

Por mais que os profissionais envolvidos no planejamento urbano tentem controlar o desenvolvimento das cidades e a movimentação das pessoas, sempre haverá uma medida relevante de traçados voluntários e indisciplinados dos habitantes; estes repercutirão na dinâmica urbana, e as diversas disciplinas que estudam a cidade, a economia regional, a sociologia e as políticas urbanas, investigam esse processo (Castello et al., 2011).

Hustwit (2011) apresenta diversas cidades no mundo que estão buscando soluções

sustentáveis. Uma situação provocativa foi demonstrada por uma iniciativa do prefeito de Bogotá, Enrique Peñalosa, que priorizou a criação de infraestrutura para pedestres e ciclistas em detrimento do sistema viário para veículos motorizados. Esse projeto contemplou 24 km de vias pavimentadas paralelas às vias despavimentadas de automóvel, ou seja, enquanto os motorizados circulam na terra (ou lama) os não motorizados podem circular em uma via confortável. Peñalosa argumenta que essa inversão de prioridades serviu para empoderar o cidadão comum, colocando-o em pé de igualdade com os mais abastados que têm a oportunidade de circular no seu próprio automóvel; antes, a bicicleta era um meio de transporte estigmatizado, essa política pública proporcionou uma nova visão de valores, e promoveu a autoestima dos habitantes da capital colombiana. Lerner (2005) relata a importância da autoestima da população e a sensação de pertencimento dos cidadãos com sua cidade; essa relação permite uma atuação corresponsável, em que o poder público pode contar com habitantes parceiros, o que permite a viabilização de projetos simples, mas de grande impacto positivo.

Vanderbilt descreve a história de Hans Moderman, que de acordo com o autor foi um profissional pioneiro e provavelmente um dos engenheiros de trânsito mais conhecidos no mundo. A prática de Moderman chamou a atenção pois ele decidiu “virar as costas a décadas de sabedoria acumulada de sua profissão” (Vanderbilt, 2009). Este engenheiro holandês propôs planos de circulação com cruzamentos inteiros em grandes avenidas sem nenhum tipo de sinalização de trânsito; a proposta girava em torno de uma teoria central que determinava dois tipos de espaço: o “universo do trânsito” e o “universo social”. Como o primeiro universo foi criado para os veículos motorizados, este acaba sendo impessoal e padronizado, além de ser resumido à velocidade, eficiência e homogeneidade. Já no universo social, a rua não é um recurso disponível para ser dominado pelas máquinas, o que define esse espaço são as pessoas, os costumes locais e o contato interpessoal. Moderman percebeu que o primeiro universo não poderia dominar o segundo, por isso propôs a retirada das placas, o que obriga os motoristas e os pedestres negociarem suas travessias, de forma que o automóvel perde seu privilégio (Vanderbilt, 2009). Dessa forma, o engenheiro holandês focou sua carreira na transdisciplinaridade, e algumas de suas percepções foram passos importantes para um campo de estudo conhecido hoje como “moderação psicológica do trânsito”. No meio da trajetória profissional de Hans Moderman, ele se associou a um planejador de transporte inglês, Ben Hamilton-Baillie; eles se aliaram em um movimento conhecido como Shared Space (espaço compartilhado), que daria origem ao conceito de *streetscape*, que consiste em projetos e estratégias que encorajam as viagens de pedestre e a fruição urbana (GDOT, 2003). A Inglaterra e a Holanda contam com diversas intervenções dessa dupla de profissionais, mas a atuação deles também se expandiu para países como Alemanha, França, Irlanda e Suécia. Além disso, este trabalho inovador vem sendo reconhecido e replicado ao redor do mundo.

Essas experiências comprovam a necessidade de entender a psicologia humana para entender a massa populacional urbana. Cristo (2013) desenvolveu uma tese dentro do campo da

psicologia para responder a seguinte pergunta: O hábito de usar automóvel tem relação com o transporte coletivo ruim? Através de sua pesquisa, que aprofundou na formação e manutenção de hábitos, chegou à seguinte conclusão: “o fato de o transporte coletivo ser ruim não explica o uso habitual do carro”. (Cristo, 2013). Aparentemente este estudo aponta o uso excessivo do automóvel como um costume que está arraigado na cultura brasileira. Esse estudo mostra que outros campos do conhecimento podem contribuir para a temática da mobilidade; a tese de Cristo (2013) serve fundamentalmente para desmantelar um senso comum (sobretudo dentro do universo político/governamental) de que somente após a implantação de uma abrangente rede de transportes é que se devem adotar políticas de restrição ao automóvel.

Gehl (2010) trabalha a transdisciplinaridade, e conecta a psicologia e a sociologia nas estratégias de planejamento urbano e planejamento de transportes. Com formação em Arquitetura e Urbanismo, este dinamarquês foi o protagonista de mudanças positivas no cenário urbano de várias cidades, sobretudo a capital de seu país, Copenhague. Gehl (2015) revela que seu interesse em ultrapassar as barreiras do estudo tradicional da arquitetura e do urbanismo surgiu das indagações de uma psicóloga que estava presente em seu cotidiano, sua esposa. Ela questionava por que os arquitetos e engenheiros de tráfego não se preocupavam em entender o comportamento das pessoas, uma vez que seus trabalhos interferiam no espaço e nos fluxos cotidianos dos indivíduos. Nesse contexto, Gehl (2015) decidiu passar anos de sua vida estudando, dentro da academia e atuando como professor, para entender teorias e formas de aplicações práticas para o provimento de qualidade de vida urbana, sempre com um olhar sensível para as pessoas. Aproximadamente após 30 anos de estudos (e diversos trabalhos relevantes publicados), Jan Gehl abriu uma empresa para prestar consultoria e realizar projetos para cidades amigáveis, habitáveis e sustentáveis, e tem obtido bastante êxito com propostas inovadoras ao redor do mundo, uma vez que já realizou trabalhos em diversos países em todos os continentes.

Jacobs (2011) desde a década de 1960 já apontava inúmeros benefícios de uma cidade amigável ao pedestre, ou seja, com atributos favoráveis à caminhabilidade; esse último conceito tem uma lógica restrita à qualidade da circulação do pedestre, e pertence ao campo de estudos da mobilidade. Gehl (2010) aborda o conceito de habitabilidade, que extrapola o conceito anterior envolvendo campos disciplinares que dão suporte ao entendimento da qualidade de vida humana nas cidades.

Herculano (2000) aponta uma dificuldade daqueles que estudam a temática do desenvolvimento, que consiste na busca de um indicador eficiente para mensurar a qualidade de vida. Dowbor (2008), como economista, critica o PIB (Produto Interno Bruto) como indicador de desenvolvimento, e fica pessimista ao contabilizar que a qualidade de vida tem piorado, mesmo que o PIB e o consumo tenham aumentado em relação às décadas anteriores no Brasil.

Enquanto o setor de transportes comemora a expansão de rodovias e o aumento da

capacidade viária, o PIB aumenta paralelamente, mas com o aumento da rede viária e da frota de veículos das últimas décadas, houve um aumento no número de acidentes de trânsito; os países que vêm abordando essas tragédias como políticas públicas de saúde têm sido exitosos na redução dos índices de mortalidade (Reis, 2009). Desde a década de 80 a OMS (Organização Mundial da Saúde) enfatiza a necessidade do caráter multidisciplinar da abordagem dos problemas de trânsito (OMS, 2015).

No início da década de 1990 surgiu o IDH (Índice de Desenvolvimento Humano); este começou a ser utilizado pela ONU (Organização das Nações Unidas), e hoje é amplamente utilizado, inclusive para a mensuração do desenvolvimento humano nas cidades. Como indicador é vantajoso, pois, além da renda média da população, considera a longevidade e índices de educação. A longevidade acaba indiretamente avaliando a saúde, salubridade, seguridade alimentar e social; já o índice de educação estabelece uma referência ao acesso às oportunidades. O Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD, 2016) admite que o IDH não abrange todos os aspectos de desenvolvimento. Sustentabilidade, democracia, participação e equidade são fatores não contemplados pelo índice. O mérito principal do IDH é fomentar o debate sobre o tema.

Seria extremamente complexo, e talvez até mesmo irresponsável, definir os limites da contribuição da multidisciplinaridade na temática urbana. Este tópico elencou principalmente alguns contributos do olhar social e do olhar econômico, mas o presente artigo não se atreve a apresentar um aparato metodológico para ser replicado, mas instiga a construção de novos paradigmas à disciplina de transportes. Para isso os pesquisadores devem expandir seus olhares e sempre reavaliar suas convicções, entendendo que o universo desse campo de estudos (o transporte) é maior que o entendimento que o pesquisador tem sobre ele.

13. CONSIDERAÇÕES FINAIS: DISCURSO DA MOBILIDADE X PRÁTICA DA MOBILIDADE

Apesar do discurso da mobilidade já ter avançado na academia, nos planos urbanos e na mídia popular, a efetividade do novo paradigma ainda não está posta. A “neutralização do conceito de mobilidade urbana despolitizou o debate e tem permitido sua banalização ao longo do seu processo de consolidação (não sem intenção expressa de alguns agentes) como termo predominante, permitindo sua utilização como um novo termo para a mesma abordagem” (Amaral, 2015).

O discurso da mobilidade, além de se esquivar de abordagens retrógradas, deve ser traduzido na prática da mobilidade, de fato, sustentável, que não está resumida à engenharia de transportes, mas a todo contexto urbano, político, social, ambiental e econômico.

Se o pesquisador da área de transportes se interessar na leitura desse artigo, provavelmente

será pelo intuito de preencher algumas lacunas que merecem aprofundamento. As analogias efetuadas neste trabalho podem não gerar entendimentos e aplicações instantâneas, mas sim fomentar novas discussões.

Dessa forma, parece relevante convidar os estudiosos do setor a ingressarem na transdisciplinaridade e multidisciplinaridade; acredita-se que com essa abordagem ampliada o campo de estudo de transportes conseguirá promover avanços ainda maiores para a nossa sociedade.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, M. (2015). *A mobilidade da cidade aos pedaços: Espaço-tempo-corpo dos deslocamentos em Belo Horizonte*. 395 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS, ANTP. (1989). *Não Transporte: a reconquista do espaço tempo social*. VII Congresso Brasileiro de Transportes Públicos. Rio de Janeiro.
- AUGÉ, M. (2004). *Não-lugares: introdução a uma antropologia da supermodernidade*. Papirus Editora, Campinas.
- AUGÉ, M. (2010). *Por uma antropologia da mobilidade*. EDUFAL/UNESP, Maceió.
- BRASIL. (2012). *Lei nº 12.587, de 03 de janeiro de 2012*. Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/112587.htm>. Acessado em: 10 jan. 2016.
- CASTELLO, I. e CASTELLO, L. (2011). *O Desenho da cidade: indisciplinado, sempre interdisciplinar*. 9º Seminário Docomomo Brasil, p. 1-14, Brasília.
- CRISTO, F. (2013). *O hábito de usar automóvel tem relação com o transporte coletivo ruim?* 157 f. Tese (Doutorado em Psicologia Social, do Trabalho e das Organizações) – Universidade de Brasília, Brasília.
- DOWBOR, L. (2008). *Democracia Econômica: Alternativas de gestão social*. 1. ed. Vozes, 2008, Petrópolis.
- GEHL, J. (2006). *La humanización del espacio urbano, la vida social entre los edificios*. Reverté, Barcelona.
- GEHL, J. (2010). *Cities for people*. Island Press, Washington.
- GEHL, J. (2015). *Entrevista realizada no Seminário de Lançamento do 'Cidade para pessoas' em Berlim*. Disponível em: www.piseagrama.org/cidades-para-pessoas.
- GEORGIA DEPARTMENT OF TRANSPORT, GDOT. (2003). *Pedestrian and streetscape guide*. EUA: Autor.
- HERCULANO, S. et al (org.). (2000). *Qualidade de Vida e Riscos Ambientais*. 1. ed. Editora da Universidade Federal Fluminense, 334 p. Niterói.
- HUSTWIT, G. (2011). *Urbanized*. [Documental]. USA.
- JACOBS, J. (2011). *Morte e Vida de Grandes Cidades*. 1. ed. WMF Martins Fontes, 2011.

499 p. São Paulo.

JACOBS, J. (1969). *The economy of cities*. Vintage, New York.

KEHL, M. R. (2015). *Olhar no olho do outro*. Revista Pise a Grama. Editora Rona n. 7, p. 22-31, jan. Belo Horizonte.

KOOLHAAS, R. (2010). *Três textos sobre a cidade*. Editora Gustavo Gili, Barcelona.

LEFEBVRE, H. (2011). *O Direito à Cidade*. Centauro Editora, São Paulo.

LEMOS, A. (2011). *Cultura da Mobilidade*. In: Beiguelman, Gisele & La Ferla, Jorge (Org.). *Nomadismos Tecnológicos*. Ed. Senac São Paulo, São Paulo.

LERNER, J. (2005). *Acupuntura Urbana*. 3ª edição Editora Record, Rio de Janeiro.

MAFFESOLI, M. (2001). *Sobre o Nomadismo: vagabundagens pós-modernas*. Tradução: Marcos de Castro. Record, Rio de Janeiro.

MELLO JORGE, M. H. P. Y LATORRE, M. R. D. O. (1994). *Traffic Accidents in Brazil: Data and Tendencies*. Cad. Saúde Públ., 10 (supplement 1): 19-44, Rio de Janeiro.

MONTE-MÓR, R.L., COSTA, G.M.; COSTA, H.S.M. (2015). *Teorias e Práticas Urbanas: condições para a sociedade urbana*. Ed. C/Arte, pp. 55-69, Belo Horizonte.

OBSERVATORIO METROPOLITANO. (2014). *La apuesta municipalista - La democracia empieza por lo cercano*. Editora Traficantes de Sueños, Madrid.

ORGANIZAÇÃO MUNDIAL DE SAÚDE, OMS. (2015). *Relatório Global sobre o estado da Segurança Viária 2015*. Suíça, 2015, 16p.

PAIXÃO, L. A. e ABRAMO, P. (2008). *Os vetores de expansão da atividade imobiliária em Belo Horizonte – 1994-2003*. Nova Economia Belo Horizonte -18 (2)- p. 229-263, Belo Horizonte.

PEIXOTO, N. (2011). *Arte móvel/Arte aérea*. In: Beiguelman, Gisele & La Ferla, Jorge (Org.). *Nomadismos Tecnológicos*. Ed. Senac São Paulo, São Paulo.

PNUD. (2016). Disponível em: <http://www.pnud.org.br>. Acessado em 17 mai. 2016.

REIS, N. (2009). *O transporte e o PIB*. Revista Transporte Moderno, vol. 1, n. 1, p. 1-8, São Paulo.

ROSA, J. G. (1994). *Grande Sertão: Veredas*. Nova Aguilar, Rio de Janeiro.

SANTOS, M. (2006). *Encontro com Milton Santos ou o mundo global visto do lado de cá*. Direção de Silvio Tandler. Documentário. Caliban Produções, Brasil.

VANDERBILT, T. (2009). *Porque dirigimos assim?: e o que isso diz sobre nós*. 1. ed. Elsevier, 2009. 297p. Rio de Janeiro.

SECCIÓN 2

TRANSPORTE MEDIANTE BICICLETA

BICYCLE TRANSPORTATION

8 A metaheuristic approach for the repositioning problem in bike sharing systems (BSS): a study case in Toluca, Mexico

Javier García Gutiérrez

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Manuel González de la Rosa

Toluca Institute of Technology

Javier Romero Torres

Universidad Autónoma del Estado de México, México

ABSTRACT

The impact of Bike Sharing Systems (BSS) in the world had experienced such success that nowadays most iconic cities in the world have adopted its own system. The particular characteristics of the user's mobility in every city have not allowed developing a generalized procedure to operate the systems. Moreover, the lack of symmetry in the mobility patterns, and the dynamic users' behavior lead to eventually an "unbalanced" system, this is, to a lack of bikes at stations, and therefore bikes have to be repositioned to stations where effective demand is present, and there is no an unified or scientifically supported methodology. In this paper we deal with a case study in Toluca City (Huizi system), in which the entity in charge of current operational activities wants to design a procedure scientifically based to perform repositioning daily activities at the minimum operational cost guarantying the availability of bikes for the users (service level). Due to operational requirements, this bi-objective problem was formulated using a dynamic scope and stated as a combinatorial optimization model and finally solved using a multi-objective evolutionary algorithm.

Keywords: Bike sharing systems; dynamic repositioning; stations balancing; multi-objective evolutionary algorithm (MOEA); NSGA-II.

1. INTRODUCTION

A Bike Sharing System (BSS) is an urban transportation mode intended to help daily commuters in the completion of the last mile travels from home to work and back, or for short urban travels within a central business district, offering in this way a faster, cheaper, healthier and environmentally friendly option compared to motorized transportation modes. BSSs operate as follows: a registered user picks up a public bicycle at any station where they are available, using it for a predefined amount of time, depending on her/his rate plan, and turns it back to another (or even the same) station of the system. Nowadays, 4th generation of BSSs allows automation on bike check-in/out processes and information collection.

In early 2016, the number of worldwide implementations had almost reached a thousand systems (Metrobike LLC, 2016). Just in the last three years (from 2012 to 2015) they had almost doubled the number of systems and bikes, this is, from 549 to 948 systems, and from around 550,000 bikes to more than 1'250,000 bikes. These numbers endorse the importance of the BSSs in important and iconic cities of Europe, East Asia and North America (DeMaio, 2008), and it is being considered the transportation mode with the highest growth rate in the history (Shaheen, et al., 2012).

The success of a BSS implementation depends on the ability to optimally design the system in terms of the location, capacity and number of stations as well as the availability of the bike fleet according to the dynamic and unbalanced demand. Among the several problems that the scientific community has paid attention to, we can mention the following: demand forecasting, network design, system dimensioning, and user's perceived level of service, among several others. Recently, these topics have been more easily met since more recent BSS technology (4th and 5th generation) can provide real time information that is indeed useful for planning and operation purposes.

The BSS repositioning problem has captured the attention in the last years due to the challenge that implies the resolution of a complex dynamic problem of operational nature that depends on endogenous and exogenous factors (Zhao et al., 2015). The importance of this problem resides in the increasing number of BSS implementations in the world and for the high marginal costs related to the repositioning activities.

The repositioning problem comes from the following circumstances: the BSS are mainly used for last mile travels or short travels in a specific moment of the day, leading to an unbalanced distribution of the bikes in the spatial and temporal dimensions and increasing the probability that a user who wants to check in the system might find a station without any bike, or on the other hand, not finding a free rack to affix the bicycle when checking out. In such cases the user might choose to walk to the next station or use another transportation mode to reach her/his destination. To avoid this, the BSS operator redistributes the bikes using (generally) motorized vehicles from full to empty stations trying to position bikes where demand are already taking place. Among the causes that lead to bike disequilibrium are the following (Vogel et al., 2011):

- Streets with slopes that discourage returns.
- Lack of bike infrastructure that allows accessibility to certain places.
- Edge effect on bike station on the limits of the system (since they generally have lower utilization).
- High or low spatial demand during the day (such as transshipments or activity points).
- High or low temporal demand during the day (such as rush hours).
- Excessive homogeneity on the type of use, or even marked preponderance of one over the other.

The bikes repositioning might represent the most delicate points on the BSS operation since it implies the significant operational costs, and since, it is mostly made using motorized vehicles (fossil fuels), sometimes the environmental pollution generated is comparable to the one it was intended to avoid with its implementation (Büttner et al., 2011). Finally, the lack of an efficient repositioning is translated into: reduction in the system capacity, conditioning the daily user and even to discourage her/him from using the system in the future. In this sense, from the managerial perspective, in order to reduce the current operational costs as well as to increment the system capacity, it is necessary to relocate the bikes at the stations efficiently. In the technical literature, repositioning schemes for shared vehicles are categorized as: user based and operator based (Allouche et al., 1999; Barth and Todd, 2001; Kek et al., 2006; Vogel and Mattfeld, 2010). In the first, users are encouraged to return the bikes to unsaturated stations to preserve the balance of bicycles between stations. In the second approach, repositioning is made by the operation entity staff. User-based repositioning might be feasible for medium-term operations whereas repositioning made by the operator is effective for short periods of time. Nevertheless, in any sense, such scopes might generally fit to the actual needs of every study case.

Mathematically, the repositioning problem for BSS had been originally managed in the literature as a derivation of the routing with pickup and delivery problem (PDP). More recently, it has been adopted the denomination of the Bike Sharing Pickup and Delivery Problem (BSPDP) as a particularization of the original PDP (Caggiani and Ottomanelli, 2012). When relocation is carried out at night when the demand of bicycles is negligible it is denominated static repositioning, otherwise, when movements are made during the day due to high variations on the levels of demand it is called dynamic repositioning.

Most of the literature approaches deal with the BS-static PDP (Forma et al., 2010, 2015; Benchimol et al., 2011; Shu et al., 2010; Chemla et al., 2011; Contrado et al., 2012; Ho and Szeto, 2014). On the dynamic view, in general, the BS-PDP is worked without focusing on repositioning patterns and time periods (Vogel and Mattfeld, 2010). Some research suggest a fixed time interval repositioning (Nair and Miller-Hooks, 2011; Sayarshad et al., 2012), and some other suggest repositioning of vehicles moving randomly from saturated to empty stations (Fricker and Gast, 2012; Angeloudis et al., 2012). Among several work related to the dynamic repositioning problem we found Caggiani and Ottomanelli (2013), Contrado et al., (2012), Rainer-Harbach et al., (2013), Raviv et al., (2013), Schuijbroek et al., (2013). One of the most recent papers about dynamic repositioning in BSS is the one presented by Regue and Recker (2014) in which a proactive approach is applied to model the forecast of bikes inventory at stations, and solve it by using an optimization model. The approach presented here resembles the idea of determining the probability of bike demand at every station for each period.

In Mexico, to date, there are three BSS located in Mexico City, Guadalajara and Toluca respectively (Ecobici, MiBici and Huizi). All of them are currently operated by different

type of entities, and moreover, under different business models that might explain the difference in current operational issues. Nevertheless, in the three of them, the repositioning problem is a common problem even though their current technology allows gathering daily operational information. From personal interviews had with the operational entities of the three systems, for repositioning purposes, the methodologies implemented consists on basic rules coming from empirical experimentation and therefore there is no an unified or scientifically supported methodology.

In this paper, we deal with a case study in the city of Toluca (Huizi system) in Mexico, where the entity in charge of current operational activities (the Directorate of Environment and Public Services of Toluca Municipality) wants to design a procedure scientifically based to perform repositioning daily activities, at the minimum operational cost, guarantying the availability of bikes for the users (service level).

This paper presents the design of a methodology to solve the BSS problem under a dynamic scope, starting from a bi-objective combinatorial formulation and solved adopting a multi-objective evolutionary algorithm (MOEA) for fast-solving. Due to the characteristics of the operational processes involved in the daily repositioning activities, it is asked the problem to be quickly solved several times a day without any feedback of any decision maker, this is, decision maker preferences are not really a concern.

2. METHODOLOGY FOR THE BIKE REPOSITIONING PROBLEM

In this work, the problem is faced under the following conditions:

1. Demand information is known. This assumption would even be true for all 4th generation BSSs in Mexico since such data is available and it is disaggregated spatially and temporarily, so that it is possible to characterize it in terms of the hour, weekday, month and season of the year.
2. Information about the weather is also known. Since this is the main deterrent factor of the BSS, and we can meet such information with some hours in advance. Therefore, we can have an idea about the immediate user's behavior.
3. A dynamic repositioning approach is recommended since a high rate use of the bicycles is expected (each bike is used by several users a day).
4. There is a given fleet size of 350 bikes. The number of bicycles at stations was initially assigned by the operator following an empirical rule. Nevertheless, as a result of the repositioning process, such number is expected to change at the end of the day.
5. It is desired to meet a certain user service level represented as the availability of bikes or racks at the stations at the moment they arrive to check-in or check-out a bike.

a) Demand information

Data information provided by the Directorate of Environment and Public Services of Toluca City allows us to characterize it spatially and temporarily. Figures 1 (a, b, c, d) and 2 show some descriptive charts about the trips already happening in this system.

Part of the bike repositioning is generated by the same BSS dynamics. Actually, the operator encourages people to turn the bike at the end of the day where it was originally borrowed. Nevertheless, the problem is not so simple. In order to have a good penetration in the society, several metrics or empirical rules have been developed by operators as indicators. One of them is related to the number of people that use one particular bicycle (daily uses per bicycle). The Institute for Transportation & Development Policy (ITDP, 2013) states that a successful BSS has rotation index in the range of 4 to 8, to avoid low cost benefit ratio, and to assure bike availability.

b) Weather information

The two main factors identified in the literature that reduce considerably the use of the bicycle as a usual transportation mode are those that restrain people to perform outdoor activities, such as heat, rain and snow. Unlike cities in the United States of America, Toluca City's weather allows the operation of the Huizi system in all stations of the year, since snowing is very unlikely to occur at any time of the year. On the other hand, heat in summer does not inhibit bike trips. The average daily temperature in Toluca City varies from 0°C to 24°C, and hardly ever is below -3° or above 27°C. The coldest month is January, in which the average low is 0°C, and high is 19°C. Historically, the hottest day of the year is April 30 with an average high of 24°C and low of 7°C.

Nevertheless, precipitation in this city occurs in most part of the year. Rain is likely to occur in at least five months of the year with more than 50% of probability. This typically happens in the months from May to September. The most common forms of precipitation, when occurs, are thunderstorms (52%), moderate rain (23%) and light rain (22%). Nevertheless, the intensity of the precipitation is typically to occur during afternoons. In Figure 3 it is shown the types of precipitation and occurrence probabilities. The order of severity is from the top down in this graph, with the most severe at the bottom. The data here presented is summarized from information about meteorological stations at Toluca City, which is available at the National Weather System (Sistema Meteorológico Nacional) in Mexico (SMN, 2015).

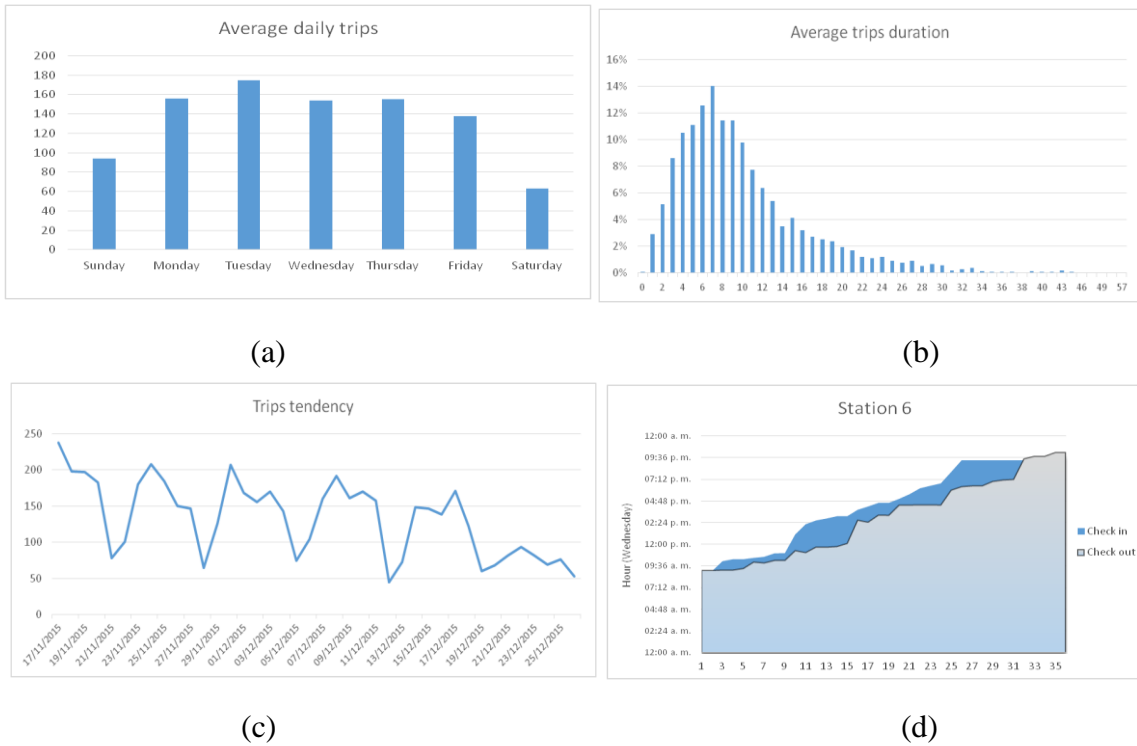


Figure 1. (a) Average daily trips, (b) trips duration of the Huizi system, (c) negative tendency in the last two months of the year, (d) check in/check out at Station 6

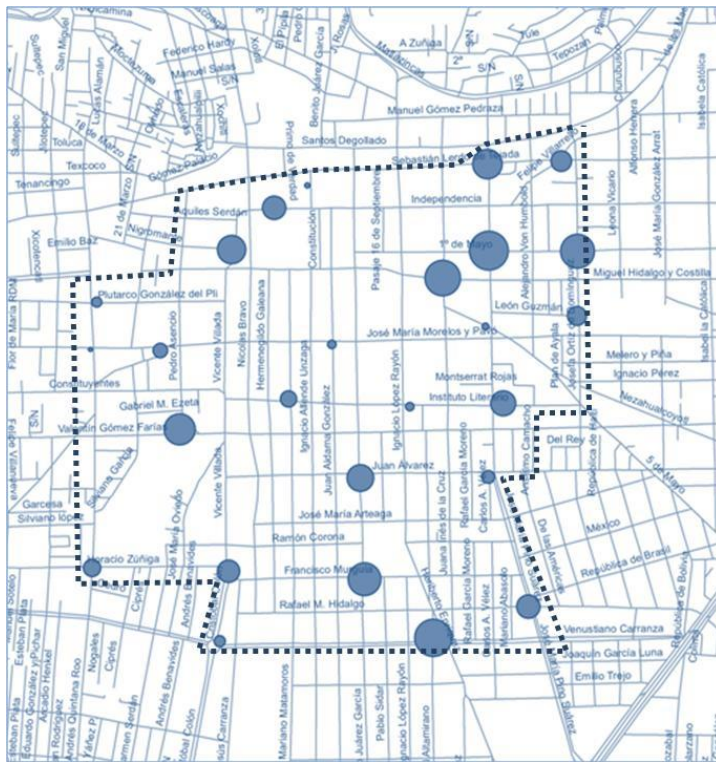


Figure 2. Activity at stations inside the Huizi Polygon

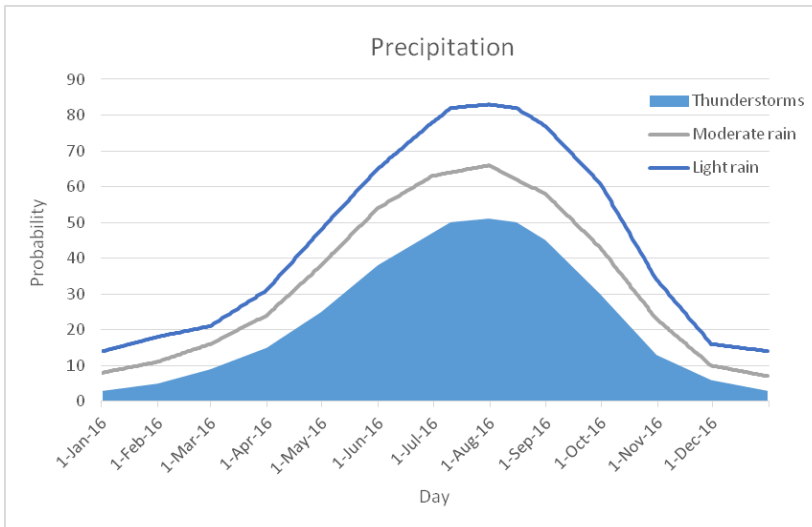


Figure 3. Chart of precipitation probability in Toluca City

The methodology follows the next steps:

1. Statistical analysis of the cyclist demand. We start from the historical data, in which daily, monthly and stations factors are computed to obtain an initial “required” number of bicycles to start a particular operations day for every station. This calculation is made in advance so that at the end of the previous day work is done so that the initial stage at the next one starts with this number at every station. In addition, this initial number is consistent with the number of bicycles available at the Huizi system. The time at this stage is set as t_0 .
2. Initial daily stage. Calculations of inventory level required at each station (expected need) are made in the following way. The number of bicycles in a given station is affected by the expected number of receiving or taking away bicycles at the following period. This expected number is calculated by using the probability of having a specified number at the period t , and it is obtained by means of the historical dynamic behavior during the day at that particular station.
3. Weather information. Lately information about weather is real time data (RTD) since it is available online at several web pages. With this data, the forecasted demand at each station, at any given period, number, however, has to be affected by a weather factor, which is indeed a deterrent factor about the number of bikes that will be effectively used.
4. Inventory level determination at the bike stations under probabilistic approach. Given the amount of bikes needed at the station in a continuous scenario (all the operations hours), and the amount of trips generated among the different pairs of origin-destination stations, also as a probability that such trips could occur, it is generated an expected minimum amount of bikes.
5. Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA) to solve the bi-objective BSS problem. A bi-objective routing problem is formulated where cost and users perceived service level, both are “simultaneously optimized”. The resolution of this problem leads to a set of Pareto solutions from which just one solution is systematically picked, which represents a compromise solution.

6. Rectification of data from the previous period. At this stage a comparison is made between the demand predicted and the actual demand experience in the previous period.

The methodology proposed for this problem is the following shown in Figure 4.

Bi-objective optimization model

Several researches have included service level as a measure of effectiveness in the system. For this case, users’ service level is a determinant factor to assure the consolidation of the BSS, given that lack of bicycles when they are needed, highly inhibits the probability that the user at the next day could consider the use of a public bicycle as a transportation mode.

Multi-Objective Evolutionary Algorithm (MOEA)

In multi-objective optimization is intended to find, for a multi-objective problem formulation either discrete or continuous, a number of representative Pareto solutions which is expected to resemble the true Pareto front. Multi-Objective Evolutionary Algorithms (MOEAs) have recently attracted scientific attention in the exploration of the Pareto fronts. Several reviews exist about different MOEA methodologies, search strategies, metrics of comparison, and real world problems such as Coello et al., (2007).

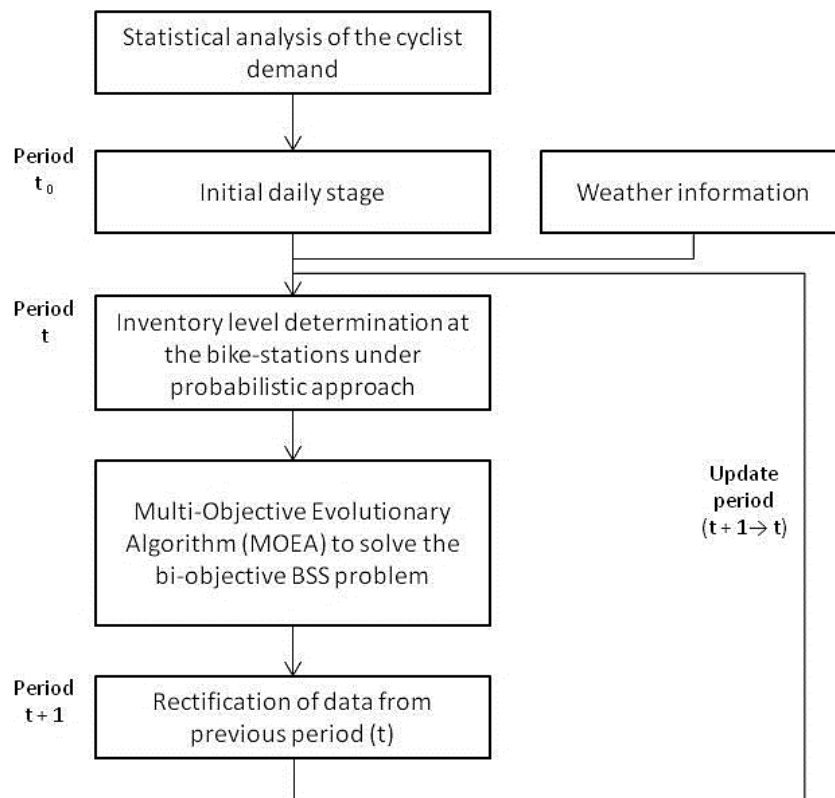


Figure 4. BSS repositioning methodology developed

The multi-objective strategy presented in this work is based in the Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II (NSGA-II). This method is a widely known algorithm that has been used for uncountable applications in the literature. It was developed by Deb et al., (2002), and it has been considered one of the most successful Multi-Objective Evolutionary Algorithms in the scientific literature. Several references exist in which NSGA-II logic is explained in detail.

For the resolution of routing problems, NSGA-II has also been used with success. For instance, in Xu et al., (2008) an NSGA-II algorithm implementation combined with an Or-opt strategy was used for solving a multi-objective vehicle routing problem with time windows. Also, an implementation was developed for solving a green vehicle routing problem (Jemai et al., 2012) in the context of Green Logistics. In another work, Beheshti et al., (2015) solved a vehicle routing problem with prioritized time windows with a co-evolutionary technique, and using NSGA-II as a benchmarking procedure. The NSGA-II follows the logic presented in Figure 5.

The goal of a Multi-Objective Evolutionary Algorithm is to obtain a set of solutions that resembles the true Pareto front. Nevertheless, the operational procedures at the BSS imply that repositioning processes are made systematically several times a day and apparently without a “decision maker” intervention. In multi-objective optimization, several approaches exist to end up with a single solution.

In this work the very next step is to systematically identify a solution with certain characteristics: computationally fast to identify and robust properties. In this sense, theory of Knee solutions is taken into account at this step. Knee solutions are considered promising parts in the Pareto front in which optimal trade-off solutions might be identified. They were first studied and defined by Das (1999), and later, those ideas were extended to EMOAs by Branke et al., (2004). Moreover, decision maker preference has also been included in NSGA-II to overcome this issue, such the one presented by Chaudhuri and Deb (2010). A recent survey about incorporating preferences is presented in Bechikh et al., (2015).

Recent studies support the use of Knee points for solving bi-objective problems (Deb and Gupta, 2010). Given that this is a combinatorial problem where the Pareto front is finite, the individual minimal for the two objectives is known, this procedure consists in calculating such distance and identify the largest one. In Figure 6 it is represented the choice of the Knee point in terms of the maximal distance from the Convex Hull of Individual Minima (CHIM) to the Pareto front.

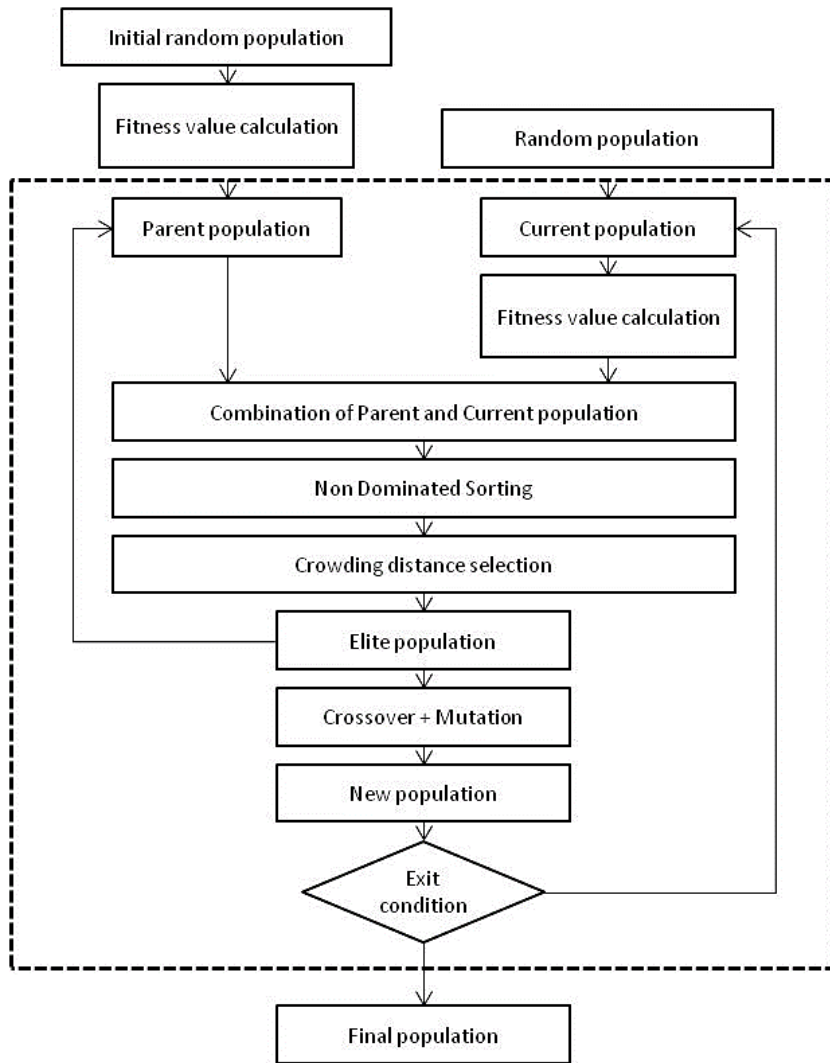


Figure 5. NSGA –II strategy for the BBS repositioning problem

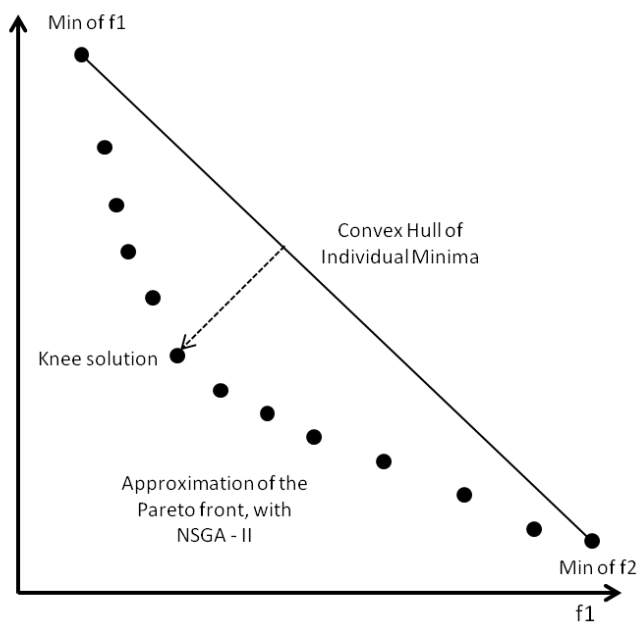


Figure 6. Knee point as the largest distance from the CHIM to the Pareto front

3. EXPERIMENTATION AND RESULTS

The NSGA –II formulation for the BSS repositioning problem was coded in MATLAB. The inputs, as depicted in Figure 1 are the database of the Huizi system and the weather information generated continuously. The code is able to receive information for generating the next scenario. At this moment, the results obtained in computer are solved in negligible time, maybe due to the relatively small size of the routes generated compared when solving large distribution problems.

4. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

In this work, we solved a problem that, due to the dynamic nature of the demand, has been difficult to model mathematically and to find an efficient way to provide to the BSS operator a redistribution schedule that might be updated through the day based on the actual needs and capacities of the operator. First, we solved a dynamic redistribution problem having knowledge on demand behavior, using inventory strategies at stations, and finally constructing a sequence of routing solutions using two objectives, and solving them economically in terms of computational time by means of an evolutionary approach. Since exact algorithms to solve the stated combinatorial problem to optimality are highly expensive in terms of computational cost, it was justified the use of the meta-heuristic approach. Moreover, given the two objectives involved in the problem conception, the use of a Multi-Objective Evolutionary Algorithm was a reasonable option since in recent years these techniques have been positioned themselves for their capabilities to quickly converge to good solutions. Also, we took advantages of “well behaved” Pareto solutions to systematically solve the sequence of problems without the inclusion of high level information from any decision maker or the BSS technical staff. We also developed a methodology to systematize the identification of such solutions. Regarding to the BSS network, the methodology here presented allowed identify deficiencies in the initial dimensioning mainly related to overestimation of the number of bikes on stations and under estimations of the number of racks actually needed.

On the other hand, the paradigm of facing the redistribution problem from a static approach is left aside. This idea would be unreal for many mid-size systems where the daily bike rotation is above from their recommendable use, at least, the operators of the BSS in Mexico clearly do not agree in adopting static redistribution strategies.

There are some recommendations addressed to the scientific community: even though there is a vast amount of multi-objective techniques, there is still a gap between the developed algorithms, which are intended to provide a well-distributed set of Pareto solutions, and the resolution of the problem itself. The development of algorithms that would include mechanisms to direct the search towards “well behaved” solutions without involving the generation of all the Pareto frontier would help in cases as the one here presented.

Due to the contributions derived from this research, and the acceptance level of the agency in charge of the Huizi system operation, we are currently working on an implementation that systematizes the resolution of the problem, and on the development of a Smartphone interface (Android) that might allow the operational staff to remotely receive information of the redistribution procedures in real time.

The problem related to the length of the parameter is already being faced running several scenarios in order to characterize or at least, to find an empirical rule that allows us to run several daily scenarios with good performance.

REFERENCES

- ALLOUCHE, J. F., BENÉJAM, E., MASSOT, M. H., PARENT, M. and PRAXITÈLE (1999). *Preliminary results from the Saint-Quentin experiment*. In Proceedings of the 78th Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- ANGELOUDIS, P., HU, J., and BELL, M.G.H. (2012). *Strategic repositioning algorithm for bicycle-sharing schemes*. In Proceedings of The 91th Meeting of the Transportation Research Board 2012, paper 12-3210.
- BARTH, M., and TODD, M. (2001). *User behavior evaluation of an intelligent shared electric vehicle system*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1760, 2001: 145-152.
- BECHIKH, S., KESSENTINI, M.; SAID, L.B., and GHÉDIRA, K. (2015). *Chapter Four - Preference incorporation in Evolutionary Multiobjective Optimization: A survey of the state-of-the-art*. In: Ali R. Hurson, Editor(s), Advances in Computers 98, 2015: 141-207.
- BEHESHTI, A.K., HEJAZI, S.R., and ALINAGHIAN, M. (2015). *The vehicle routing problem with multiple prioritized time windows: A case study*. Computers & Industrial Engineering 90, 2015: 402-413.
- BENCHIMOL, M., BENCHIMOL, P., CHAPPERT, B., DE LA TAILLE, A., LAROCHE, F., MEUNIER, F., and ROBINET, L. (2011). *Balancing the stations of a self service “bike hire” system*. RAIRO-Operations Research 45, 2011:1-15.
- BRANKE, J., DEB, K., DIEROLF, H., and OSSWALD, M. (2004). *Finding knees in multi-objective optimization*. In PARALLEL PROBLEM SOLVING FROM NATURE (PPSN-VIII) 2004, 2004: 722–731. Germany.
- BÜTTNER, J., MLASOWSKY, H., BIRKHOLZ, T., GROPER, D., FERNANDEZ, A.C., EMBERGER, G., and BANFI, M. (2011). *Optimising bike sharing in European cities: A handbook*. Intelligent Energy Europe program (IEE). Retrieved from <http://obisproject.com>. Accessed on October. 30, 2015.
- CAGGIANI, L., and OTTOMANELLI, M. (2012). *A modular soft computing based method for vehicles repositioning in bike-sharing systems*. Procedia Social and Behavioral Sciences 54, 2012: 675-684.
- CAGGIANI, L., and OTTOMANELLI, M. (2013). *A dynamic simulation based model for optimal fleet repositioning in bike-sharing systems*. Procedia Social and Behavioral Sciences

87, 2013: 203–210.

CHAUDHURI, S., and DEB, K. (2010). *An interactive evolutionary multi-objective optimization and decision making procedure*. Applied Soft Computing 10, 2010: 496-511.

CHEMLA, D., MEUNIER, F., and WOLFLER-CALVO, R. (2011). *Balancing a bike-sharing system with multiple vehicles*. In 12e congrès annuel de la ROADEF, March 2011.

COELLO, C., LAMONT, G.B., and VAN VELDHUIZEN, D.A. (2007). *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. Springer.

CONTRADO, C., MORENCI, C., and ROUSSEAU, L. M. (2012). *Balancing a dynamic public bike-sharing system*. Retrieved from <https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2012-09.pdf>. 2012, Accessed on March 20, 2014.

DAS, I. (1999). *On characterizing the “knee” of the Pareto curve based on normal-boundary intersection*. Structural Optimization 18, 1999: 107–115.

DEB, K., PRATAP, A., AGARWAL, S., and MEYARIVAN, T. (2002). *A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation 6, 2002: 182-197.

DEB, K., and GUPTA, S. (2010). *Understanding knee points in bicriteria problems and their implications as preferred solutions principles*. KanGAL Report Number 20100005.

DEMAIO, P. (2008). *The bike-sharing phenomenon. The history of bike-sharing*. In Carbusters Magazine 36. November 2008.

FORMA, I.A., RAVIV, T., and TZUR, M. (2010). *The static repositioning problem in a bike-sharing system*. In Proceedings of the 7th Triennial Symposium on Transportation Analysis (TRISTAN), 2010: 279-282.

FORMA, I.A., RAVIV, T., and TZUR, M. (2015). *A 3-step math heuristic for the static repositioning problem in bike-sharing systems*. Transportation Research Part B 71, 2015: 230-247.

FRICKER, C., and GAST, N. (2012). *Incentives and regulations in bike-sharing systems with stations of finite capacity, 2012*. Retrieved from <http://arxiv.org/pdf/1201.1178v1.pdf>. Accessed on February 18, 2013.

HO, S.C., and SZETO, W.Y. (2014). *Solving a static repositioning problem in bike-sharing systems using iterated tabu search*. Transportation Research Part E 69, 2014: 180-198.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY, ITDP. (2013). *The bike-share planning guide*.

JEMAI, J., ZEKRI, M., and MELLOULI K. (2012). *An NSGA-II algorithm for the green vehicle routing problem*. In Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Lecture Notes in Computer Science 7245, Springer, 2012: 37-48.

KEK, A.G.H., CHEU, R.L., and CHOR M.L. (2006). *Relocation simulation model for multiple-station shared-use vehicle systems*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 1986, 2006: 81-88.

METROBIKE LLC. (2016). *The Bike-sharing World Map*. Retrieved from <http://www.metrobike.com>. Accessed on January 10, 2016.

NAIR, R., and MILLER-HOOKS, E. (2011). *Fleet management for vehicle sharing operations*. Transportation Science 45, 2011: 524–540.

- RAINER-HARBACH, M., PAPAZEK, P., HU, B., and RAIDL, G.R. (2013). *Balancing bicycle sharing systems: a variable neighborhood search approach*. In *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization, Lecture Notes in Computer Science*. Springer, 2013: 121–132.
- RAVIV, T., TZUR, M., and FORMA, I.A. (2013). *Static repositioning in a bike-sharing system: models and solution approaches*. *European Journal of Transportation Logistics* 2, 2013: 187–229.
- REGUÉ, R. & RECKER, W. (2014). *Using gradient boosting machines to predict bikesharing station states*. In the Transportation Research Board 93rd Annual Meeting 2014.
- SAYARSHAD, H., TAVASSOLI, S., and ZHAO, F. (2012). *A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization*. *Applied Mathematical Modelling* 36, 2012: 4944–4951.
- SCHUIJBROEK, J., HAMPSHIRE, R., and VAN HOEVE, W.J. (2013). *Inventory rebalancing and vehicle routing in bike sharing systems*. Tepper School of Business.
- SHAHEEN, S.A., MARTIN, E.W., COHEN, A.P., and FINSON, R.S. (2012). *Public Bikesharing in North America: early operator and user understanding*. Report 11-26. Mineta Transportation Institute. San José State University.
- SHU, J., CHOU, M., LIU, Q., TEO, C. P., and WANG, IL. (2010). *Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of re-distribution*. Retrieved from <http://www.bschool.nus.edu.sg/Staff/bizteocp/BS2010.pdf>. Accessed on May 15, 2014.
- SISTEMA METEOROLÓGICO NACIONAL, SMN. (2015). *Data from the Mexican National Weather System Mexican National Water Commission (Comisión Nacional del Agua, CONAGUA)*. Retrieved from <http://smn.cna.gob.mx/>. Accessed on October 25, 2015
- VOGEL, P., GREISER, T. & METTFELD, D.C. (2011). *Understanding bike-sharing systems using data mining: exploring activity patterns*. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 20, 2011: 514–523.
- VOGEL, P. & MATTFELD, D.C. (2010). *Modeling of repositioning activities in bike-sharing systems*. In *Proceedings of 12th WCTR, July 11-15, 2010, Lisbon, Portugal*.
- XU, H., FAN, W., WEI, T., and YU, L. (2008). *An Or-opt NSGA-II algorithm for multi-objective Vehicle Routing Problem with Time Windows*. In *Automation Science and Engineering. CASE 2008. IEEE International Conference on, August 23-26, 2008, 2008: 309-314*.
- ZHAO, J., WANG, J., and DENG, W. (2015). *Exploring bikesharing travel time and trip chain by gender and day of the week*. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 58(B), 2015: 251-264.

9 Modelo de elección de la bicicleta pública y privada incluyendo variables latentes

Oscar Arbeláez Arenas, MSc
Iván Reinaldo Sarmiento Ordosgoitia, PhD
Jorge Eliécer Córdoba Maquilón, PhD
Universidad Nacional de Colombia

RESUMEN

Los modelos de elección discreta se han usado comúnmente en la planeación del transporte para estimar las cuotas de mercado de modos motorizados, pero muy poco para estimar las de modos no motorizados. La presente investigación propone un modelo de elección entre modos motorizados y la bicicleta como alternativa en estudio, presentando una metodología general que luego se aplica a la ciudad de Medellín, Colombia. Los datos usados corresponden a 1,231 usuarios de distintos modos de transporte a quienes se les realizaron encuestas de preferencias reveladas y de preferencias declaradas en 2014, con las que se estimaron modelos híbridos de elección discreta con la inclusión de las variables latentes: seguridad y comodidad. Los modelos fueron usados luego con fines predictivos para conocer el porcentaje potencial de usuarios de la bicicleta teniendo en cuenta el modo en el que los encuestados realizan su viaje principal.

Como hallazgo más relevante se cuenta la posibilidad de modelar la disposición de uso de la bicicleta frente a modos motorizados, en un contexto urbano con la inclusión de variables latentes a los modelos de elección discreta. A partir de lo anterior se obtuvo un porcentaje de usuarios potenciales para la bicicleta del 5.13% de los viajes motorizados de 2014 en la ciudad de Medellín, estando éstos principalmente representados en usuarios de auto, bus y metro.

Palabras clave: bicicleta, variables latentes, modelos de elección discreta, modelos híbridos, demanda de transporte.

1. INTRODUCCIÓN

La planeación de transporte en bicicleta se ha hecho cada vez más necesaria dado el incremento en su uso, sobre todo desde los inicios del siglo XXI. Distintos autores le atribuyen diferentes causas al incremento de su utilización, entre las que se cuentan la conciencia de la reducción de gases contaminantes; los tiempos de viaje en ciudades con altos niveles de congestión y el bajo costo de la infraestructura necesaria para su uso comparada con la infraestructura vehicular, con lo cual, la adecuada planeación para atender

su demanda se hace relevante teniendo en cuenta que, es un medio de transporte eficiente en tiempo de viaje y económico para el usuario (Heinen, 2009; Pucher, Dill y Handy, 2010; Shaheen, Guzman y Zhang, 2010).

La demanda de un modo de transporte en general se relaciona con el tiempo de recorrido, costo del viaje y las características socioeconómicas del usuario. En el caso de la bicicleta, estos factores no explican de manera suficiente la demanda asociada a su uso, dando paso a las actitudes y percepciones como factores explicativos adicionales a las variables ya mencionadas. Dichas percepciones o actitudes son susceptibles de ser incorporadas a los modelos de demanda mediante la construcción de variables latentes, es decir, aquellas variables que no son susceptibles de ser medidas directamente pero que se pueden estimar mediante la correlación entre variables explicativas e indicadores de percepción. La inclusión de variables latentes a los modelos de elección discreta ha permitido tomar en cuenta el efecto de las percepciones que los usuarios tienen de los modos de transporte, con lo cual el poder explicativo de los modelos es mayor (Ben-Akiva et al., 2002; Yáñez, Raveau y Ortúzar, 2010).

En la estimación de los modelos de elección de esta investigación se utilizó el método secuencial de forma tal que, las variables latentes, en este caso, seguridad y comodidad, son construidas mediante un modelo de Múltiples Indicadores y Múltiples Causas (MIMIC por sus siglas en inglés) y luego son usadas como una variable adicional que se incorpora en la estimación del modelo de elección discreta, en la realización de dicha tarea se utilizó el “software” SPSS AMOS (Arbuckle, 2006). Las alternativas de transporte que se consideraron son: auto, bus y metro, modos enfrentados de forma individual y excluyente a las alternativas de usar la bicicleta pública (“bikeshare”), bicicleta privada, y los usos combinados de bicicleta pública más bus o bicicleta pública más metro.

La formulación de la encuesta definitiva estuvo precedida de un grupo focal que permitió identificar las variables relevantes, y de una prueba piloto que se realizó con el fin de estimar los tiempos de toma de la información y aclarar aquellas preguntas que resultaron confusas al encuestado. Posteriormente, se procedió a aplicar la encuesta definitiva y a ordenar la información de campo en una base de datos. Con esa información y usando el “software” Python Biogeme (Bierlaire, 2009) se estimaron los modelos de elección discreta. Se encuestó a 1,231 individuos en la ciudad de Medellín, Colombia, con una encuesta de preferencias reveladas, y se obtuvieron 11,079 encuestas de preferencias declaradas.

2. DESARROLLO

2.1 Demanda de transporte en bicicleta

La demanda de un modo de transporte en general se relaciona con el tiempo de viaje, el costo y las características socioeconómicas del usuario. Para el caso de la bicicleta, estos factores resultan insuficientes para explicar la demanda asociada a su uso. Rietveld (2004) describe

como determinantes de uso de la bicicleta factores como: los costos de uso, las características sociodemográficas del individuo, los factores socioculturales, donde también agrupa las percepciones y las características propias de otros modos de transporte, elementos que conforman el marco general de decisión de uso de la bicicleta.

Se incluyen además entre los determinantes de uso de la bicicleta los siguientes factores: la distancia a recorrer por parte del ciclista asociada al esfuerzo requerido para realizar el viaje; la existencia de infraestructura complementaria como biciparqueaderos; el entorno, entendido como las condiciones topográficas, de urbanismo y características paisajísticas de la zona; las condiciones climáticas referidas al largo plazo (estaciones) y el estado del tiempo del día a día; factores psicológicos asociados al usuario y como una variable de peso adicional la percepción de la seguridad (Heinen, 2011). Fernández (2012) contribuye notablemente al incluir en la modelación un conjunto de variables de percepción relacionadas con el uso o no uso de la bicicleta, con el objetivo de caracterizar el fenómeno sin tener en cuenta las demás alternativas que pueda tener el usuario, al construir un modelo de elección en el cual construye cuatro variables latentes: conveniencia, actitudes pro-bici, condicionantes externas y limitación física.

El tiempo de viaje y el costo son variables que tienen directa relación con la teoría de la utilidad aleatoria, la cual establece que el individuo actúa como un ser económico, el cual busca maximizar una función de utilidad frente a un conjunto de alternativas discretas (Domencich, T. y McFadden, D., 1975). Características como el género, la edad, el nivel de ingreso y las actividades a realizar son factores sociodemográficos que determinan también la utilización de la bicicleta. En cuanto a la seguridad, ésta constituye una percepción subjetiva propia de cada individuo, con lo que una percepción de riesgo mayor conducirá a usar menos o no usar la bicicleta, la cual se percibe menos segura que caminar o usar el automóvil. La variable seguridad resulta de importancia en términos de análisis de la demanda, estando ésta listada entre las razones más frecuentes por las cuales no es usada la bicicleta como modo de transporte (Heinen, E., Maat, K. y Wee, B., 2011; Jacobsen, P. y Rutter, H., 2012; Pucher et al., 2010).

En las aproximaciones a la modelación de la demanda de un modo no motorizado como es la bicicleta, se han utilizado principalmente como fuentes de datos: encuestas origen y destino; aforos realizados en infraestructura exclusiva para bicicletas o en las vías más usadas por los ciclistas; y encuestas de preferencia revelada (PR) y/o preferencia declarada (PD), siendo ésta última la de mayor utilización. La prevalencia del uso de PD en la modelación de la demanda de transporte se relaciona con la capacidad de control por parte de quien realiza el experimento al presentar ante el encuestado una situación posible donde se mide una intención de comportamiento.

2.2 Modelos de elección discreta

Los modelos de elección discreta se basan en la teoría de la utilidad aleatoria, en la cual se

asume que los individuos q son racionales y siempre elegirán entre la combinación de alternativas j que maximiza su utilidad U_{jq} ; lo anterior implica que el proceso de elección se da bajo el supuesto de racionalidad perfecta, en la cual los individuos recopilan información sobre las alternativas, utilizan probabilidades para convertir esta información en atributos percibidos y a continuación, mediante un proceso cognitivo, que se puede representar como la agregación de los niveles de los atributos percibidos en un índice de utilidad unidimensional que se maximiza (McFadden, 2001).

Así pues, se define una función de utilidad U_{jq} que presenta dos componentes: una parte observable V_{jq} por el investigador, determinada por el vector de características o atributos medibles de la alternativa y el vector de características socioeconómicas del individuo (por ejemplo: tiempo de viaje, costo, entre otras); y un componente no observable ε_{jq} , que incorpora las distintas fuentes de aleatoriedad y refleja gustos particulares relacionados con la elección, además de posibles errores por parte del investigador en la medición u observación (Ortuzar y Willumsen, 2008). Típicamente la función de utilidad tiene la forma presentada en la Ecuación 1:

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq} \quad (1)$$

Dado que las variables latentes pueden ser incluidas en la parte medible de la ecuación (V_{jq}), la cual se denomina utilidad sistemática, se obtiene la función de utilidad con la forma de la Ecuación 2, donde X representa los atributos medibles, η las variables latentes, θ son parámetros a estimar y ε el término de error ya descrito al cual se asocia una distribución con media cero y desviación σ .

$$U = v(X, \eta; \theta) + \varepsilon \quad \text{y} \quad \varepsilon \sim D(0, \sigma) \quad (2)$$

Es necesario incluir una función d_j (Ecuación 3) que expresa la elección de una alternativa j en función de la utilidad asumiendo la maximización de ésta, así:

$$d_j = \begin{cases} 1 & \text{si } u_j \geq u_s; j \neq s, \forall j, s \in A \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (3)$$

Donde s es cualquier alternativa distinta de j , y todas las alternativas pertenecen a un conjunto A .

2.3 Modelación incluyendo variables latentes

Las variables latentes son atributos intangibles que se asocian a percepciones, actitudes o factores psicológicos que normalmente no pueden ser medidos directamente, pero que influyen en el proceso de elección. Al ser no identificables de forma directa no cuentan con una escala de medición, pero pueden ser representadas a través de indicadores. Con el fin de

hacer identificables las variables latentes se debe realizar una encuesta de preferencia revelada o de preferencia declarada para poder capturar las percepciones de los usuarios asociadas a características intangibles de las alternativas que tienen a disposición.

Mediante modelos híbridos de elección discreta ha sido posible incluir la influencia de las percepciones y actitudes en la elección de un modo de transporte (Ben-Akiva et al., 2002), consecuentemente la evidencia empírica acerca de la superioridad de la especificación de modelos con la inclusión de variables latentes se ha presentado en la literatura (Ortuzar y Garrido, 1994) (Cordoba, J. y Jaramillo, G., 2012; Yáñez et al., 2010).

Para la especificación de modelos híbridos, partimos del sistema de ecuaciones de un modelo de elección representado por las Ecuaciones 2 y 3 y de un modelo de variables latentes representado por las Ecuaciones 4 y 5, así:

$$\eta = h(x; \alpha) + \zeta \quad y \quad \zeta \sim D(0, \Psi) \quad (4)$$

$$y = g(x, \eta; \Lambda) + \xi \quad y \quad \xi \sim D(0, \Gamma) \quad (5)$$

Donde:

η es un vector de m variables latentes,

y es el vector de p indicadores de las variables latentes,

x es un vector de los k atributos observables por el modelador,

θ, α y Λ son matrices de parámetros desconocidos,

$(\zeta, \varepsilon, \xi)$ y $(\Psi, \sigma$ y $\Gamma)$ son vectores de componentes de error con media cero y matrices de covarianza, respectivamente, y

h, v y g son funciones que para el caso de este análisis son lineales.

La Figura 1 presenta la relación de causalidad entre las variables explicativas y los demás elementos del modelo híbrido, siendo la parte superior el modelo de las variables latentes o MIMIC y la parte inferior (último recuadro) el modelo de elección.

La función de distribución de las variables latentes dadas las variables observables acorde con la Ecuación 1 es $f_1(\eta|x; \alpha, \Psi)$. La función de distribución de la utilidad dadas las variables latentes y los atributos observables a partir de la Ecuación 2 es $f_2(u|x, \eta; \theta, \sigma)$. La función de distribución de los indicadores, condicionados a la función de distribución de las variables latentes y observables acorde con la Ecuación 5 es $f_3(y|x, \eta; \Lambda, \Gamma)$.

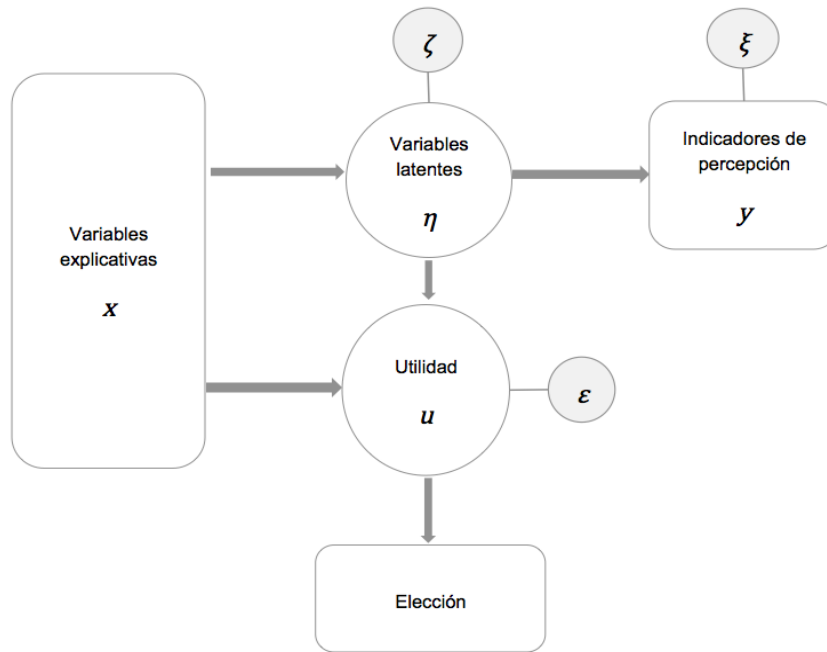


Figura 1. Representación del modelo híbrido de elección discreta

Con el fin de estimar los parámetros desconocidos, se emplea la máxima verosimilitud, la cual se construye desde el caso más sencillo que implica la probabilidad del individuo i de escoger la alternativa j , (es decir, $d_j = 1$) sin tener en cuenta las variables latentes la cual se puede escribir a partir de las Ecuaciones 2 y 3 como (Ecuación 6):

$$P(d_j = 1|x_j; \theta, \sigma) = P(u_j \geq u_s; j \neq s, \forall s \in A) \quad (6)$$

Asumiendo independientes los términos de error (ζ, ε), se introducen las variables latentes a la función de probabilidad resultando (Ecuación 7):

$$P(d_j = 1|x_j; \theta, \alpha, \sigma, \Psi) = \int_n P(d_j = 1|x_j; \theta, \sigma) f_1(\eta|x; \Gamma, \Psi) \partial \eta \quad (7)$$

Asumiendo independientes los términos de error (ζ, ε, ξ), las variables latentes y los indicadores se pueden incluir para obtener la probabilidad condicional de las variables observadas y y d_j sobre las variables exógenas x con lo que la función de probabilidad para el modelo híbrido se puede escribir como se muestra en la Ecuación 8:

$$f_4(d_j, y|x_j; \theta, \Lambda, \alpha, \sigma, \Psi, \Gamma) = \int_n P(d_j = 1|x_j; \theta, \sigma) f_3(y|x, \eta; \Lambda, \Gamma) f_1(\eta|x; \alpha, \Psi) \partial \quad (8)$$

Donde el primer factor de la integral es el modelo de elección, el segundo factor corresponde a la ecuación de medición y el tercero corresponde a la ecuación estructural de la variable latente.

Dado que se puede asumir cualquier tipo de distribución para los términos de error en el modelo de elección, si asumimos errores independientes e idénticamente distribuidos (IID Gumbel) la ecuación 6 se transforma en un modelo logit multinomial (Ecuación 9):

$$\begin{aligned}
 P(d_j = 1 | x_j; \eta, \theta) &= P(u_j \geq u_s; \forall s \in A) = P(v_j + \varepsilon_j \geq v_s + \varepsilon_s; \forall s \in A) \\
 &= P(v_j + \varepsilon_j \geq v_s + \varepsilon_s; \forall s \in A) \\
 &= \frac{e^{v_j}}{\sum_{s \in A} e^{v_s}} \quad (9)
 \end{aligned}$$

Mediante la utilización de la máxima verosimilitud es posible estimar los parámetros desconocidos del modelo integrado, así, el proceso de estimación del modelo maximiza el logaritmo de la muestra de la función de probabilidad sobre los parámetros desconocidos, como se muestra en la Ecuación 10:

$$\max_{\beta, \Lambda, \Gamma, \Xi, \Psi, \Theta} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{j_i} d_{i,j} \ln f_4(d_{i,j}, y_i | x; \beta, \Lambda, \Gamma, \Xi, \Psi, \Theta) \quad (10)$$

La estimación de modelos con ambas clases de variables tiene dos aproximaciones: la simultánea y la secuencial. La primera consiste en la estimación en conjunto del modelo de elección y el modelo de variables latentes (MIMIC) por medio de la máxima verosimilitud simulada, pero dado que esta función resulta de una integral multidimensional sobre la función de distribución de las variables latentes que debe ser solucionada de forma numérica, su uso aún es incipiente, y si bien se considera un enfoque más eficiente, es de gran complejidad (Johansen, B., 2013; Yáñez et al., 2010).

La otra aproximación consiste en la estimación secuencial del modelo híbrido, la cual se divide en dos etapas: en la primera se estima el modelo de las variables latentes mediante la maximización de la verosimilitud para estimar los parámetros de las ecuaciones estructurales en función de las variables explicativas; luego se estima el modelo de elección discreta mixto a partir de la distribución asumida para los términos de error, incorporando los valores esperados de las variables latentes y estimando luego los parámetros de la función de utilidad mediante la máxima verosimilitud, integración numérica o máxima verosimilitud simulada. Si bien la literatura señala como deficiencia del método secuencial el producir estimadores ineficientes, también señala que si el tamaño muestral es representativo de la población en estudio, la metodología secuencial y simultánea obtienen parámetros muy similares (Raveau, S. et al., 2010).

2.4 Metodología

Se organizó un grupo focal para el cual se eligieron ocho individuos de forma aleatoria, con distintos perfiles socioeconómicos y usuarios de todos los modos, incluyendo dos usuarios asiduos de la bicicleta. A partir del análisis de las respuestas de esos individuos, se establecieron las siguientes variables influyentes en la elección: tiempo de viaje (TV) y costo (C) como variables explicativas; y comodidad (COM) y seguridad (SEG) como variables latentes a construir a partir de indicadores medidos en escala de Likert (Likert, 1932) en la encuesta de preferencias reveladas.

Para las variables explicativas, la elección de unidades fue expedita y sus niveles de variación atienden a la literatura, la cual reporta que para experimentos con más de cuatro niveles de variación el encuestado responderá enfocando su elección en menos atributos o atendiendo a uno solo y en otros casos respondiendo al azar por fatiga o ansiedad por terminar la encuesta (Ortuzar and Willumsen, 2008; Saelensminde, 1999). Por lo anterior, el diseño sólo incluyó tres niveles de variación para las variables explicativas siendo éstos el nivel bajo, medio y alto. Se realizó un diseño experimental mediante la combinación de variables con distintos atributos, utilizando las tablas de Kocur et al. (1982) las cuales proporcionan el número de opciones hipotéticas necesarias para probar el diseño.

Durante la encuesta, se enfrentó al individuo a un conjunto de elección que incluye la alternativa que actualmente utiliza para su viaje principal contra un modo con bicicleta, ya sea bicicleta pública, bicicleta privada, o la combinación modal de bicicleta pública con bus o bicicleta pública con metro. También se le presentaron fotografías con una infraestructura hipotética, que tenía tres posibilidades mutuamente excluyentes con el fin de incluir la variable infraestructura como variable ficticia o “dummy” (por su nombre en inglés), con la cual fuera posible agrupar los datos de tal forma que, el efecto de un cambio en la infraestructura para la bicicleta tenga efecto o no, lo cual se denomina un diseño por bloques. La infraestructura considerada en la encuesta comprendió: carril compartido con el tráfico vehicular (sin infraestructura); bicicarril o delimitación con pintura de un carril no compartido con el tráfico vehicular y carril segregado totalmente o ciclo vía en la cual el usuario de la bicicleta no interactúa con el tráfico automotor.

La encuesta de preferencias reveladas estableció las características socioeconómicas de la población encuestada, sus lugares de origen, destino, modo en que realiza su viaje principal, motivo, uso de la bicicleta pública, uso de la bicicleta privada y su frecuencia. Los niveles de variación para estas variables fueron asignados teniendo en cuenta la caracterización del usuario típico de la bicicleta de la ciudad de Medellín.

Para la construcción de las variables latentes se establecieron indicadores de percepción a medir en una escala de Likert. Para la variable comodidad se calificaron aspectos propios de la experiencia de uso del modo en que se realiza el viaje principal y la bicicleta (y_1), su relación con el estado del tiempo (y_2) y la percepción de la contaminación (y_3). Para la

variable latente seguridad, se formularon indicadores para medir el grado de temor frente a un accidente, caída o choque para los modos pertenecientes al conjunto de alternativas (y_4) de cada usuario y la bicicleta, así mismo, la percepción del usuario frente a la seguridad externa y la probabilidad de hurto durante la utilización del modo (y_5) o la ocurrencia de una agresión física o verbal durante el viaje (y_6). La Figura 2 presenta la relación entre los indicadores, causados por las variables latentes y las variables explicativas.

La cantidad de encuestas por modo actual quiso reflejar la partición modal estimada de acuerdo a la encuesta origen y destino del año 2012. En total, para la ciudad de Medellín se encuestaron 1,231 individuos a los que se les realizaron 11,079 encuestas PD mediante entrevistas personales utilizando computadores portátiles con el formulario que incluía la encuesta de preferencias reveladas y la encuesta de preferencias declaradas. Se incluyeron individuos que usaban cualquier modo actual, cuyas edades estuvieran dentro de las típicas de los posibles usuarios de bicicleta, es decir, entre 16 y 60 años.

3. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Características socioeconómicas

Una vez aplicada la encuesta se realizó la estadística descriptiva de la misma. La distribución de la muestra por género fue 51.9% masculino y 49.1% femenino; el 77.1% de los encuestados son estudiantes o trabajadores, lo que es consistente con que el 49.1% de los viajes se realizan por trabajo, el 34.9% por estudio y el 16% por otros, que incluyen compras o citas médicas en su mayoría; el 35.2% de la muestra tiene primaria y/o secundaria y el 42.3% tiene estudios de educación superior en curso; la distribución de edades se concentra entre los 20 y los 24 años con el 30.7%; el 80% de la muestra tiene ingresos de \$1,200,000 pesos colombianos o menos.

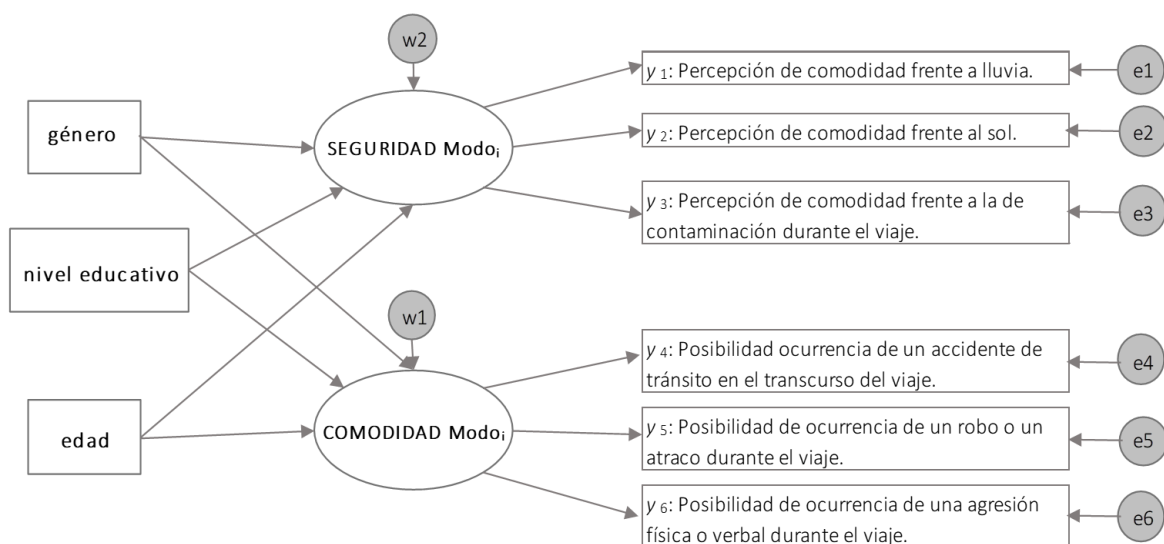


Figura 2. Representación del modelo MIMIC para las variables latentes seguridad y comodidad

3.2 Resultados modelos de elección discreta

A partir de la Ecuación 2 se estimaron modelos de elección discreta con el fin de aplicar modelos logit multinomial MNL como punto de partida y luego modelos híbridos de elección discreta con las Ecuaciones 11 a 23, donde el sufijo i representa la alternativa en la que se realiza el viaje principal y los sufijos $bpub$, $bpriv$, $bpubb$ y $bpubm$ representan las alternativas de uso de la bicicleta pública, privada, bicicleta pública más bus y bicicleta pública más metro como conjunto de elección. Los valores a estimar corresponden a los parámetros desconocidos β y λ .

$$U_{\text{mod } o_i} = ASC_{\text{mod } o_i} + \beta \cdot X + \beta_{\text{seg_mod } o_i} \cdot \eta_{\text{seg_mod } o_i} + \beta_{\text{com_mod } o_i} \cdot \eta_{\text{com_mod } o_i} + \varepsilon_{\text{mod } o_i} \quad (11)$$

$$U_{bpub} = ASC_{bpub} + \beta \cdot X + \varepsilon_{bpub} \quad (12)$$

$$U_{bpriv} = ASC_{bpriv} + \beta \cdot X + \beta_{\text{seg}} \cdot \eta_{\text{seg}} + \beta_{\text{com}} \cdot \eta_{\text{com}} + \varepsilon_{bpriv} \quad (13)$$

$$U_{bpubb} = ASC_{bpubb} + \beta \cdot X + \varepsilon_{bpubb} \quad (14)$$

$$U_{bpubm} = ASC_{bpubm} + \beta \cdot X + \varepsilon_{bpubm} \quad (15)$$

$$\eta_{\text{com_mod } o_i} = \Phi \cdot X + \omega_1 \quad (16)$$

$$y_1 = \lambda_1 \cdot \eta_{\text{com_mod } o_i} + \xi_1 \quad (17)$$

$$y_2 = \lambda_2 \cdot \eta_{\text{com_mod } o_i} + \xi_2 \quad (18)$$

$$y_3 = \lambda_3 \cdot \eta_{\text{com_mod } o_i} + \xi_3 \quad (19)$$

$$\eta_{\text{seg_mod } o_i} = \Gamma \cdot X + \omega_2 \quad (20)$$

$$y_4 = \lambda_4 \cdot \eta_{\text{seg_mod } o_i} + \xi_4 \quad (21)$$

$$y_5 = \lambda_5 \cdot \eta_{\text{seg_mod } o_i} + \xi_5 \quad (22)$$

$$y_6 = \lambda_6 \cdot \eta_{\text{seg_mod } o_i} + \xi_6 \quad (23)$$

La mayoría de parámetros estimados con el modelo MNL (Tabla 1) fueron significativos al 95% de nivel de confianza y los signos de las variables resultaron ser los esperados.

Para el modelo híbrido por el método secuencial se estimó un modelo MIMIC (Figura 2), con el cual previa especificación, se realiza la hipótesis que las variables género, nivel educativo y edad son variables explicativas y dichas variables producen las variables latentes seguridad y comodidad, que a la vez causan los indicadores de percepción presentados como (y1)-(y6), los cuales a su vez, se asocian a los términos de error (e1)-(e6) de la Figura 2.

La Tabla 2 presenta los resultados de la estimación de parámetros del modelo MIMIC relativa a la percepción de los usuarios del modo que actualmente usan, para construir las variables comodidad y seguridad del modo actual.

La Tabla 3 presenta los resultados de la relación causal entre las variables explicativas y las

variables latentes seguridad y comodidad de los distintos tipos de usuarios, pero en este caso con relación a su percepción sobre la bicicleta. Los resultados para las variables por modo presentan buen ajuste en cuanto al test-t y algunas variables alcanzan hasta 90% de confianza. La variable comodidad se explica por el nivel educativo para el usuario del modo auto, mientras para el usuario de la moto, del bus y del metro, se explica por la edad.

Para los usuarios de bicicleta, la comodidad está en función del género, siendo las mujeres las que más incómoda la consideran. La variable seguridad queda explicada para los usuarios de auto por la edad y el nivel educativo, para los de la moto por el nivel educativo, para los del bus por el género y para los del metro, el modelo no arroja resultados satisfactorios; luego de un análisis de la muestra para este tipo de usuarios, no se observó variación significativa en cuanto a la opinión sobre la seguridad de este modo de transporte, esta calificación no varía con las características del usuario.

Una vez identificadas las variables latentes se estima un modelo logit mixto, que se presenta por tipos de usuario (Tabla 4), el test de radio de verosimilitud fue calculado para cada modelo por tipo de usuario y resultó que debe preferirse en todos los casos el modelo híbrido MH, dado que teniendo éste más parámetros, siempre ajusta en mayor grado que el MNL. Para el modelo híbrido la inclusión de la variación aleatoria para el costo de viaje resultó significativa a excepción del modo auto, con esta variable es posible capturar la mayor heterogeneidad en los datos. La variable comodidad resultó significativa en los modelos de auto y bus, más no para el modelo de moto, lo cual se explica porque la percepción de comodidad de ambos modos resulta muy similar, luego de analizar la tendencia en las respuestas a los indicadores de percepción; de forma análoga no resulta significativa para los usuarios de metro. La variable latente seguridad resulta significativa para los modelos de auto, bus y metro.

Tabla 1. Resultados del modelo MNL

| Nombre de la variable | | Auto | Moto | Bus | Metro |
|---------------------------------|---------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| | | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) |
| C. Modal (Modo evaluado) | ASC_modoi | - | 2.28 (8.36) | 1.39 (3.64) | 1.99 (6.56) |
| C. Modal (B. pública) | ASC_BPUB | -1.77 (-4.94) | 0.569 (3.13) | 0.782 (6.34) | 0.26 (1.39) |
| C. Modal (B. privada) | ASC_BPRIV | -1.83 (-4.6) | - | - | - |
| C. Modal (B. pública + Metro) | ASC_BPUBB | -1.12 (-7.05) | 0.429 (0.38) | 0.447 (1.02) | 2.72 (3.3) |
| C. Modal (B. pública + bus) | ASC_BPUBM | -2.05 (-9.42) | 0.187 (0.17) | 0.663 (1.5) | 1.34 (1.59) |
| Tiempo de viaje | B_Time | -0.055 (-3.89) | -0.027 (-1.77) | -0.0665 (-9.28) | -0.0687 (-6.04) |
| Costo | B_Cost_scaled | -0.343 (-3.27) | -1.4 (-8.04) | -0.221 (-2.72) | -0.242 (-1.84) |
| Género | B_sex | -0.327 (-1.67) | - | 0.0918 (0.74) | -0.401 (-1.6) |
| Infraestructura | B_infra1 | -0.34 (-1.26) | 0.643 (2.4) | 0.108 (0.76) | 0.509 (2.44) |
| | B_infra2 | 0.157 (0.72) | 0.0508 (0.17) | -0.0101 (-0.07) | -0.712 (-3.03) |
| Motivo de viaje | B_mot1 | - | -1.47 (-1.41) | -0.164 (-0.92) | 0.0736 (0.22) |
| | B_mot2 | - | 0.701 (0.49) | 0.801 (3.68) | 0.104 (0.28) |
| Nivel educativo | B_edu1 | - | - | -10.7 (-0.19) | 0 (0) |
| | B_edu2 | - | - | -0.16 (-0.4) | 0.529 (0.55) |
| | B_edu3 | - | - | -0.8 (-2.21) | 0.949 (1.34) |
| | B_edu5 | - | - | -0.78 (-2.19) | 1.03 (1.45) |
| | B_edu6 | - | - | -0.263 (-0.75) | 1.61 (2.23) |
| Número de variables | | 9 | 10 | 16 | 16 |
| Número variables significativas | | 6 | 5 | 7 | 6 |
| Número de observaciones | | 450 | 369 | 1404 | 630 |
| Tamaño muestral | | 50 | 41 | 156 | 70 |
| Inicial log-verosimilitud | | -724.247 | -593.883 | -2259.651 | -1013.946 |
| Final log-verosimilitud | | -649.108 | -394.665 | -2083.383 | -855.214 |
| Rho-cuadrado | | 0.091 | 0.319 | 0.071 | 0.141 |

Tabla 2. Resultados del modelo MIMIC por tipo de usuario para el modo actual

| Modo | Variables latentes | Variables explicativas | | | | | |
|-----------|--------------------|--|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | | Xgenero | | Xedad | | Xnivel educativo | |
| | | Coef. | t-test | Coef. | t-test | Coef. | t-test |
| Auto | nseguridad | -0.017 | -0.096 | -0.097 | -1.847 | 0.159 | 2.734 |
| | ncomodidad | -0.029 | -0.16 | -0.016 | -0.297 | -0.271 | -4.265 |
| Moto | nseguridad | -0.109 | -0.483 | -0.005 | -0.037 | 0.166 | 2.377 |
| | ncomodidad | 0.331 | 1.47 | 0.166 | 2.377 | -0.051 | -0.745 |
| Bus | nseguridad | -0.384 | -2.838 | -0.023 | -0.619 | -0.03 | -0.704 |
| | ncomodidad | 0.053 | 0.432 | -0.078 | -2.275 | 0.017 | 0.429 |
| Metro | nseguridad | -0.152 | -0.893 | 0.038 | 0.739 | 0.064 | 1.103 |
| | ncomodidad | -0.125 | -0.656 | -0.124 | -2.128 | -0.037 | -0.558 |
| Bicicleta | nseguridad | -0.37 | -2.299 | 0.457 | 0.245 | 0.09 | 1.523 |
| | ncomodidad | 0.457 | 2.858 | -0.047 | -0.877 | -0.069 | -1.18 |
| | Variables Latentes | Indicadores latentes Coef. (test-t) | | | | | |
| | | SEgy4 | SEgy5 | SEgy6 | COMy1 | COMy2 | COMy3 |
| Auto | nseguridad | 0.62 (7.078) | 1.068 (10.817) | 1.293 (12.217) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.541 (6.287) | 0.705 (7.883) | 1.195 (11.54) |
| Moto | nseguridad | 0.261 (2.742) | 0.991 (9.031) | 1.263 (10.664) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.283 (2.933) | 1.595 (12.202) | 0.515 (5.178) |
| Bus | nseguridad | 0.745 (11.211) | 0.572 (8.811) | 0.838 (12.419) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.93 (14.1) | 1.041 (15.345) | 0.93 (14.104) |
| Metro | nseguridad | 1.119 (10.836) | 1.457 (12.683) | 1.288 (11.837) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.674 (6.879) | 1.0 (9.551) | 0.699 (7.111) |
| Bicicleta | nseguridad | 0.773 (9.793) | 0.82 (10.283) | 1.047 (12.438) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.847 (10.683) | 1.151 (13.405) | 0.716 (9.311) |

Tabla 3. Resultados del modelo MIMIC para la bicicleta por tipo de usuario

| Modo | Variables latentes | Variables Explicativas | | | | | |
|--------------------------------|--------------------|------------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-------------------|
| | | Xgenero | | Xedad | | Xnivel educativo | |
| | | Coef. | t-test | Coef. | t-test | Coef. | t-test |
| Bicicleta/ Usuario Auto | nseguridad | 0.15 | 0.782 | -0.172 | -2.899 | 0.041 | 0.65 |
| | ncomodidad | 0.04 | 0.202 | 0.243 | 3.799 | 0.018 | 0.268 |
| Bicicleta/ Usuario Moto | nseguridad | -0.24 | -0.994 | 0.034 | 0.664 | 0.213 | 2.819 |
| | ncomodidad | 0.268 | 1.144 | 0.052 | 2.819 | -0.073 | -1.031 |
| Bicicleta/ Usuario Bus | nseguridad | -0.316 | -2.504 | -0.024 | -0.695 | 0.137 | 3.338 |
| | ncomodidad | 0.216 | 1.636 | 0.083 | 2.254 | -0.139 | -3.229 |
| Bicicleta/ Usuario Metro | nseguridad | -0.443 | -2.211 | -0.052 | -0.879 | 0.042 | 0.621 |
| | ncomodidad | 0.331 | 1.676 | 0.108 | 1.825 | -0.054 | -0.805 |
| Bicicleta/ Usuario Auto | nseguridad | 0.611 (6.541) | 0.666 (7.061) | 0.929 (9.32) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.158 (1.806) | 1.092 (10.432) | 0.38 (4.252) |
| Bicicleta/ Usuario Moto | nseguridad | 0.372 (3.775) | 0.80 (7.514) | 0.183 (1.846) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.183 (1.846) | 1.417 (11.341) | 0.349 (3.476) |
| Bicicleta/ Usuario Bus | nseguridad | 0.744 (11.796) | 0.841 (13.038) | 1.018 (15.1) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.369 (6.029) | 1.029 (14.937) | 0.735 (11.371) |
| Bicicleta/ Usuario Metro | nseguridad | 0.487 (5.033) | 0.603 (6.13) | 1.02 (9.6) | - | - | - |
| | ncomodidad | - | - | - | 0.298 (3.172) | 0.918 (8.869) | 0.871 (8.495) |

Tabla 4. Resultados del modelo híbrido de elección discreta

| Nombre de la variable | | Auto | Moto | Bus | Metro |
|---------------------------------|---------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|
| | | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) |
| C. Modal (Modo evaluado) | ASC_modoi | -2.58 (-1.3) | 2.81 (5.47) | 6.3 (10.44) | 2,71 (4,66) |
| C. Modal (B. pública) | ASC_BPUB | 0.329 (1.68) | 1.22 (3.74) | 2.62 (4.67) | 2,32 (1,89) |
| C. Modal (B. privada) | ASC_BPRIV | - | - | - | - |
| C. Modal (B. pública + bus) | ASC_BPUBB | -5.34 (-3.03) | 1.98 (1.56) | 6.28 (8.28) | 4,52 (3,41) |
| C. Modal (B. pública + Metro) | ASC_BPUBM | -6.4 (-3.58) | 1.22 (0.93) | 6.22 (8.29) | 2,71 (2,05) |
| Tiempo de viaje | B_Time | -0.063 (-3.66) | -0.0399 (-2.06) | -0.077 (-8.92) | -0.10 (-6.85) |
| Costo | B_Cost_scaled | -0.797 (-3.45) | -2.38 (-6.36) | -1.12 (-6.99) | -0,59 (-3.08) |
| Variación aleatoria del costo | B_Cost_s | -1.52 (-3.24) | -2.06 (-4.62) | -2.56 (-10.73) | -1.8 (-6,35) |
| Género | B_sex | -0.936 (-3.1) | - | 0.24 (1.19) | -1.32 (-3.11) |
| Infraestructura | B_infra1 | - | -0.657 (-1.79) | -0.0583 (-0.3) | - |
| | B_infra2 | - | -0.0804 (-0.22) | 0.403 (2.18) | - |
| Motivo de viaje | B_mot1 | -0.586 (-1.13) | - | -0.568 (-1.52) | - |
| | B_mot2 | -0.913 (-1.29) | - | -1.33 (-3.72) | - |
| Edad | B_edad1 | 4.99 (2.62) | - | - | - |
| | B_edad2 | 3.87 (2.29) | - | - | - |
| | B_edad3 | 5.9 (3.18) | - | - | - |
| | B_edad4 | 7.21 (3.63) | - | - | - |
| | B_edad5 | 8.73 (3.9) | - | - | - |
| | B_edad6 | 8.18 (3.74) | - | - | - |
| Nivel educativo | B_edu1 | - | - | -0.337 (-0.36) | - |
| | B_edu2 | - | - | -0.85 (-1.67) | -2.4 (-1.75) |
| | B_edu3 | - | - | -0.622 (-1.36) | -2.5 (-2.16) |
| | B_edu5 | - | - | -0.79 (-1.76) | - |
| | B_edu6 | - | - | -0.888 (-2) | -2.75 (-2.38) |
| Seguridad | B_Seg | 4.9 (3.49) | 0.571 (0.5) | 0.499 (0.67) | 3.5 (3.53) |
| Comodidad | B_Com | 1.93 (2.27) | -0.0295 (-0.05) | -2.29 (-3.8) | -3.55 (-2.57) |
| Número de variables | | 18 | 11 | 19 | 14 |
| Número variables significativas | | 14 | 5 | 12 | 11 |
| Número de observaciones | | 450 | 369 | 1404 | 630 |
| Tamaño muestral | | 50 | 41 | 156 | 70 |

| Nombre de la variable | Auto | Moto | Bus | Metro |
|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) | Coef. (t-test) |
| Inicial log-verosimilitud | -724.25 | -593.88 | -2259.65 | -1013.95 |
| Final log-verosimilitud | -582.54 | -387.98 | -2009.52 | -838.66 |
| Rho-cuadrado | 0.17 | 0.33 | 0.10 | 0.16 |

Con el fin de obtener los porcentajes de usuarios potenciales según el modo de transporte habitual, se estimaron las probabilidades de elección de los modos utilizando enumeración muestral con la totalidad de la muestra, al calcular las probabilidades de esta forma y luego descontando el porcentaje de lexicográficos asociados a cada modo se estimó qué porción de los usuarios encuestados consideran la bicicleta como una alternativa viable para la realización de sus viajes. Se afectaron dichos porcentajes por la partición modal actual para conocer del total de los viajes realizados en los modos analizados, qué porcentaje de estos usuarios consideran la bicicleta como modo alternativo para ser elegido eventualmente. Para los usuarios actuales de modos motorizados tomando auto, moto, bus y metro en la ciudad de Medellín, el potencial de usuarios de la bicicleta privada es del 4.35% del total de viajes motorizados, de forma análoga el potencial de la bicicleta pública es del 0.78% del total de viajes motorizados, para un total de 5.13% de potencial de usuarios sobre los viajes motorizados realizados en la ciudad de Medellín. Esto contrasta con el uso actual de la bicicleta en la ciudad que es del orden del 1% de los viajes motorizados.

4. CONCLUSIONES

Los modelos de elección discreta con la inclusión de variables latentes permiten incluir los efectos de las percepciones y aspecto psicológicos, con lo cual aumenta el poder explicativo del proceso de elección. Se demostró la posibilidad de captar dichas percepciones en el caso de usuarios enfrentados a la elección entre su modo actual y la bicicleta, en función de los indicadores propuestos que se relacionan directamente con la interacción personal entre el usuario y la decisión de usar determinado modo.

Luego de modelar la elección de la bicicleta pública y privada frente a las alternativas motorizadas más utilizadas en la ciudad de Medellín como caso de estudio, se obtuvieron las probabilidades de uso por modo, con las cuales se estableció el porcentaje de usuarios potenciales, teniendo en cuenta los determinantes de uso encontrados en la revisión de la literatura y la inclusión de las variables latentes producto del grupo focal. A la luz de la cantidad porcentual de usuarios potenciales se encuentra que el modo está subutilizado ya que la cuota actual de usuarios de la bicicleta en la ciudad (1% de los motorizados) es la quinta parte de la potencial (5.13%).

Los modos con mayor potencial de usuarios de la bicicleta, quienes podrían migrar o usarla para viajes que cumplan con sus expectativas de tiempo de viaje, costo y percepciones fueron el bus y el auto con 2.39% y el 1.63%, respectivamente. La bicicleta privada tiene más potencial que la pública de acuerdo con los resultados. El potencial de migración a la

bicicleta desde modos como el auto y la moto pueden aportar en términos de mejora en la movilidad, reducción en la contaminación y como solución parcial a la congestión de la ciudad, mientras que el aporte de la bicicleta como complemento a viajes en metro y bus puede mejorar la accesibilidad de los usuarios a sus destinos desde los paraderos y estaciones.

REFERENCIAS

- ARBUCKLE, J.L. (2006). *Amos 7.0 User's Guide*. SmallWaters Corporation, Chicago.
- BEN-AKIVA, M., WALKER, J., BERNARDINO, A. T., GOPINATH, D. A., MORIKAWA, T., Y POLYDOROPOULOU, A. (2002). *Integration of choice and latent variable models*. Perpetual Motion: Travel Behaviour Research Opportunities and Application Challenges, 431–470.
- BIERLAIRE, M. (2009). *Estimation of discrete choice models with Biogeme*.
- CÓRDOBA, J. E., and JARAMILLO, G. P. (2012). *Inclusion of the Latent Personality Variable in Multinomial Logit Models Using the 16pf Psychometric Test*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 54, 169–178.
- DOMENCICH, T., Y MCFADDEN, D. (1975). *Urban Travel Demand-A Behavioral Analysis*.
- HEINEN, E. (2009). *The impact of work-related factors on levels of bicycle commuting*, (January), 1–19.
- HEINEN, E. (2011). *Bicycle commuting*. (D. U. of Technology, Ed.). IOS Press, The Netherlands.
- HEINEN, E., MAAT, K., Y WEE, B. (2011). *The role of attitudes toward characteristics of bicycle commuting on the choice to cycle to work over various distances*. *Transportation Research Part D: Transport and environment*, 16(2), 102–109.
- JACOBSEN, P. Y RUTTER, H. (2012). *Cycling safety*. Pucher, J, Buehler, R. Eds, 393.
- JOHANSEN, B. (2013). *Modelling the effects of personality traits on ridership: The case of high speed rail in Norway*.
- MCFADDEN, D. (2001). *Economic choices*. *The American Economic Review*, 91(3), 351–378.
- ORTÚZAR, J., Y GARRIDO, R. (1994). *A practical assessment of stated preferences methods*. *Transportation*, 289–305.
- ORTUZAR, J., Y WILLUMSEN, L. (2008). *Modelos de transporte*. Ed. Universidad de Cantabria.
- PUCHER, J., DILL, J., Y HANDY, S. (2010). *Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: an international review*. *Preventive Medicine*, 50 Suppl 1, S106–25.
- RAVEAU, S., DAZIANO, R., YÁÑEZ, M. F., BOLDUC, D., Y ORTÚZAR, J. (2010). *Sequential and simultaneous estimation of hybrid discrete choice models*. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2156(1), 131–139.
- SHAHEEN, S., GUZMAN, S. Y ZHANG, H. (2010). *Bikesharing in Europe, the Americas, and Asia*. *Research Record: Journal of ...*, 2143(-1), 159–167.

YÁÑEZ, M. F., RAVEAU, S. Y ORTÚZAR, J. DE D. (2010). *Inclusion of latent variables in Mixed Logit models: Modelling and forecasting*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 44(9), 744–753.

10 Sistema de compartilhamento de bicicletas: um estudo de viabilidade em uma universidade brasileira

Caio Moura Vieira

Pastor Willy Gonzales Taco

Zuleide Oliveira Feitosa

Universidade de Brasília, Brasil

RESUMO

O Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB) encontra-se saturado de carros; com isso a mobilidade interna ao Campus é prejudicada e os deslocamentos do ciclista e do pedestre ficam comprometidos. Este é um problema que motiva a verificação da viabilidade de um Sistema de Compartilhamento de Bicicletas (SCB), visto que a facilitação da mobilidade inclui a integração de diferentes meios de deslocamentos. Frente a este problema, a pesquisa teve como objetivo levantar se há demanda para o uso do sistema (SCB) no Campus Darcy Ribeiro. O método que foi utilizado é composto por quatro etapas principais, que são: (i) Estudo de experiência de sistemas de compartilhamento de bicicletas utilizados, atualmente ou no passado, no Brasil e em outros países. (ii) Análise das características físicas da Universidade de Brasília. (iii) Coleta de dados por meio de questionário online. (iv) Análise dos dados. O questionário foi respondido por 519 pessoas. Os resultados reuniram indicadores de que existe a demanda para o SCB. 79,54% disse que utilizaria o SBC baseado em seus deslocamentos na UnB. Identificaram-se ainda os locais de concentração de demanda e o perfil dos usuários. Conclui-se que os resultados são significativos para a criação do SCB principalmente na UnB. Sugere-se que este trabalho sirva de referência para a escolha de um SCB mais apropriado à realidade local. Também, espera-se que estes resultados possam ser aplicados em outras universidades.

Palavras chave: Bicicleta, Compartilhamento, Universidade.

1. INFORMAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

A necessidade de tornar as cidades mais sustentáveis é urgente. Por exemplo, o período pós Segunda Guerra Mundial é marcado pela crescente dependência do automóvel privado na maioria das grandes cidades. Recentemente são reconhecidos os impactos negativos causados pelo uso do carro, em termos de congestionamento, poluição e redução de atividades físicas (Fishman, 2015).

A adoção de modelos capazes de reduzir o consumo de matéria prima e emissão de poluentes é um dos meios mais viáveis de sustentabilidade das cidades. A mobilidade urbana e os

problemas ambientais são exemplos expressivos de que as cidades brasileiras clamam algum modo de intervenção. A população, principalmente de baixa renda, encontra dificuldades em seus deslocamentos, como superlotação do transporte público, congestionamento de vias e imprevisibilidade no tempo de viagem.

O Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília (UnB) encontra-se saturado de carros, com isso a mobilidade interna ao Campus é prejudicada. Segundo Feitosa (2010), os estacionamentos lotados mostram que há forte competição por espaço, ocupação indevida de vagas, formação de fila dupla, etc. O referido Campus apresenta uma extensão de quase quatro quilômetros quadrados; essa grande área torna a caminhada para realizar certos deslocamentos uma atividade cansativa e demorada. O transporte público não atende todos os deslocamentos internos. Esses três modais somados ao uso da bicicleta compõem as principais maneiras de deslocamentos internos e apresentam características próprias com dificuldades pontuais na realização de suas viagens dentro do campus. A bicicleta do sistema de compartilhamento tem vantagens e desvantagens em relação a cada um deles. A bicicleta é o modal mais rápido para viagens em centros urbanos inferiores a cinco quilômetros (BRASIL, 2007).

Para realização da tabela ilustrativa considerou-se pequenas distâncias como menores de um quilômetro e meio, médias distâncias entre 1.5 e 7.5 quilômetros, e distâncias superiores foram consideradas grandes distâncias.

Tabela 1. Comparação do SCB com outros modos de transporte

| Sistema de compartilhamento de bicicletas (SCB) | Vantagens do SCB | Desvantagens do SCB |
|--|---|--|
| Automóvel individual | Não poluente. Menor área de estacionamento. Mais rápido para curtas distâncias. Saudável. | Vulnerável às condições climáticas. Dificuldade de transportar cargas grandes. Desvantajoso para grandes distâncias. |
| Automóvel coletivo | Não poluente. Não tem dependência de horários. Mais rápido para curtas e médias distâncias. Saudável. | Vulnerável às condições climáticas. Desvantajoso para grandes distâncias. |
| Caminhada | Menos esforço para se locomover médias distâncias. | As bicicletas estão presas às estações. Necessidade de estar devidamente cadastrado no sistema. |

Nesse contexto, a bicicleta surge para os frequentadores da universidade (funcionários, professores e alunos) como um modal alternativo, além de ser um meio de transporte sustentável. De cinco cidades com sistema de compartilhamento de bicicletas analisadas por Fishman (2015), somente uma não reduziu o uso de carros.

O transporte por meio da bicicleta para ir à universidade nem sempre é possível; entretanto existe uma demanda para o Sistema de Compartilhamento de Bicicletas no Campus Darcy Ribeiro da UnB. As pessoas que normalmente utilizam outro meio de transporte para chegar até o campus podem utilizar a bicicleta compartilhada para o transporte interno. Frente a esta realidade surge a necessidade de caracterizar essa demanda e desenvolver um sistema para atendê-la.

O Sistema de Compartilhamento de Bicicletas (SCB) é um sistema que disponibiliza bicicletas em uma determinada região. Normalmente, o usuário deve se cadastrar no programa para ter acesso às bicicletas; esse usuário pode retirá-la de qualquer estação e devolvê-la quando finalizar sua viagem. Existem diferentes tipos de SCB que operam de acordo com suas singularidades.

A ideia principal é que uma bicicleta seja utilizada por vários usuários ao dia; isso reduz os custos de operação, já que a bicicleta fica menos tempo ociosa. Portanto, de modo geral, propõe-se verificar a existência de uma demanda para o sistema de compartilhamento de bicicleta no Campus Darcy Ribeiro da UnB. De maneira mais específica, objetivam-se obter informações necessárias para julgar a viabilidade de um SCB no Campus e estimar os pontos com maior número de potenciais usuários.

1.2 História dos sistemas de compartilhamento de bicicleta

O sistema de compartilhamento de bicicleta foi criado por Luud Schimmelpennink, vereador de Amsterdam, em 1965, um sistema chamado Witte Fietsen (Bicicletas Brancas). A proposta era disponibilizar 20 mil bicicletas de uso gratuito, que podiam ser retiradas e devolvidas em qualquer lugar. Entretanto essa proposta foi rejeitada pela assembleia municipal. Apoiadores de Schimmelpennink espalharam 50 bicicletas pintadas de branco pela cidade. Sem sistemas de travas, algumas foram vandalizadas e outras recolhidas pela polícia, com a justificativa de incitarem o roubo (ITDP, 2014).

A história do sistema de compartilhamento de bicicletas pode ser dividida em três gerações, surgindo hoje uma transição para a quarta geração. A primeira representada pelo sistema que deu origem aos sistemas de compartilhamento de bicicleta criado na Holanda, citada anteriormente. A segunda geração pode ser representada pelo sistema adotado em Copenhague em 1995, que contava com bicicletas especialmente desenhadas para usos intensos; a bicicleta deveria ser retirada e devolvida na mesma estação, sendo feito um depósito de moedas para a utilização do sistema (DeMaio, 2009).

A terceira geração é impulsionada em 2005 com o sistema Velo'v criado em Lyon, França. O sistema contava com 1500 bicicletas e com diversas tecnologias, como sistema eletrônico de trava, cartão inteligente, acesso pelo telefone celular, entre outros (DeMaio, 2009).

A quarta geração ainda não está bem definida, porém alguns avanços tecnológicos são marcantes, como a utilização de painéis de energia solar para abastecer as estações e o compartilhamento de bicicletas elétricas, as quais geram maior conforto ao usuário e permitem percorrer maiores distâncias.

O avanço tecnológico dos sistemas veio acompanhado com o grande aumento de sua utilização. As bicicletas públicas (como são chamadas os SCB) fazem parte da política de mobilidade de várias cidades do mundo inteiro.

O número de cidades que operam um SCB cresceu de 13 em 2004 para 855 em 2014 (Fishman, 2015). De 2009 a 2014 mais de 500 cidades aderiram aos sistemas de bicicletas públicas (García-Gutiérrez et al., 2014).

1.3 Panorama brasileiro

No Brasil, o Bicicleta Livre (BL) foi pioneiro ao ser idealizado por alunos de graduação da Universidade de Brasília em 2007 e lançar dezoito bicicletas em 2009 voltadas para a mobilidade interna ao Campus (Machado et al., 2011).

O primeiro sistema automatizado brasileiro que se enquadra na terceira geração de SCB é o Samba, nome dado ao sistema de compartilhamento de bicicletas criado no Rio de Janeiro (Malatesta et al., 2013).

Desde então surgiram outros sistemas que estão em funcionamento em pelo menos nove capitais, os quais trabalham com sistemas similares ao Samba. Esses sistemas estão representados na Figura 1.

No Distrito Federal está em operação o Bike Brasília, que atende a região central de Brasília com 30 estações. A Figura 2 mostra a localização das estações em funcionamento.

Nas Universidades brasileiras, o BICIVATES é o único SCB automatizado em operação encontrado na revisão de literatura realizada em dezembro de 2015; esse sistema terá uma abordagem especial a seguir.

O Campus Darcy Ribeiro da UnB é o maior campus da universidade, com aproximadamente quatro km². O Campus apresenta uma grande malha cicloviária, como pode ser visto na Figura 3, o que facilitará a circulação dos usuários do SCB.

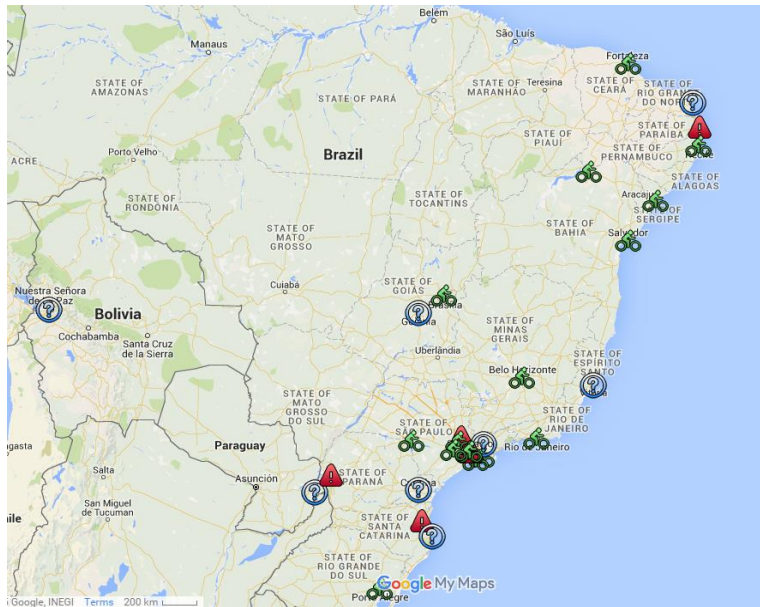


Figura 1. Mapa com os sistemas de compartilhamento de bicicleta cadastrados no Bike-sharing World Map

Fonte: MEDDIN e DEMAIO, 2015

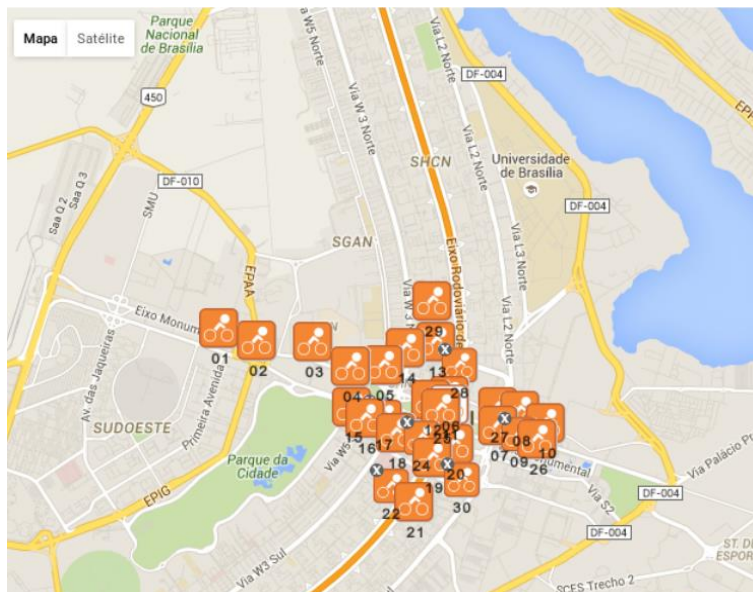


Figura 2. Mapa das estações do Bike Brasília

Fonte: Bike Brasília, 2015

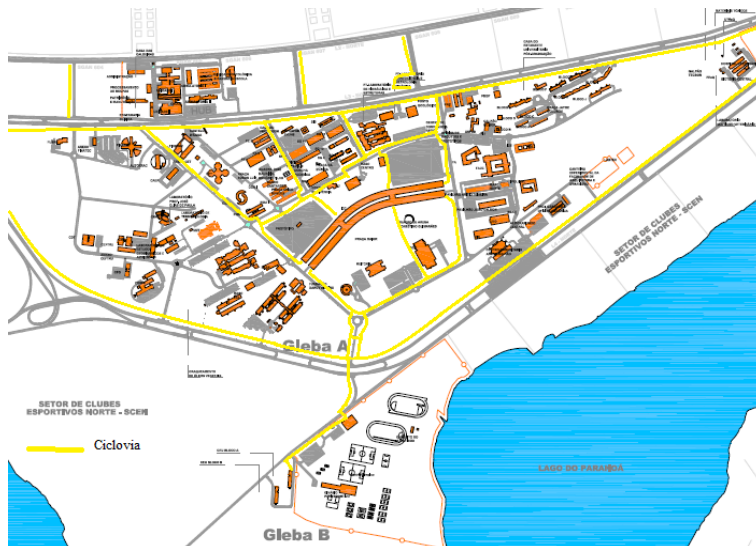


Figura 3. Campus Darcy Ribeiro da Universidade de Brasília

Fonte: UnB, 2015

1.4 Exemplos de sistemas internacionais

Os sistemas de compartilhamento de bicicletas estão se espalhando pelo mundo inteiro; vários desses sistemas poderiam ser escolhidos como referência para a criação de um sistema próprio na UnB.

Foram escolhidos os sistemas estrangeiros *Vélib'* e *NYU Bike Share*. O primeiro por ser um sistema de referência mundial. O segundo por ser um sistema próprio de uma universidade, funcionando em paralelo a um sistema de compartilhamento de bicicletas da Cidade de Nova York, caso parecido com o encontrado em Brasília.

O *Vélib'* é um sistema parisiense que serve como referência mundial. O sistema é operado pela SOMUPI, uma associação de duas empresas privadas que trabalham com publicidades e propaganda. O sistema foi proposto pelo prefeito de Paris. A empresa que operasse o sistema de compartilhamento teria a sua disposição outdoors públicos, propaganda em ônibus, entre outros painéis para propaganda. Duas grandes companhias disputaram a licitação: a SOMUPI e a Group for Paris. Depois de um processo de licitação bastante competitivo, a SOMUPI foi vencedora com uma proposta do número de bicicletas três vezes maior que a inicial, 20.600 bicicletas (Nadal, 2007). Hoje o sistema opera com aproximadamente esse mesmo número de bicicletas e com 1800 estações (*Vélib'*, 2015).

O *Vélib'* se destaca tanto pela grande quantidade de bicicletas, quanto pela tecnologia envolvida no processo. O usuário pode comprar *tickets* diários ou mensais na própria estação ou pela internet, ou fazer cadastros anualmente pela internet. Esse cadastro anual pode ser feito pela conta em um banco ou pela *Vélib' account*, que serve como garantia para a empresa, caso algo aconteça com a bicicleta no período em que ela está na posse de um usuário. Existe uma política de descontos para pessoas que já tenham algum tipo de desconto

no transporte público, como estudantes. A retirada das bicicletas é realizada no painel das estações, no qual o usuário digita seus dados ou utiliza um cartão para liberar a bicicleta. Nos terminais existe mapa da cidade com a localização de todas as estações e o número da central de atendimento, caso o usuário precise de alguma ajuda. Existem as estações V'+; são estações que apresentam fluxo unilateral, ou seja, as pessoas mais retiram as bicicletas do que devolvem para a estação. Para minimizar esse fenômeno, os usuários que devolverem suas bicicletas nas estações V'+ ganham tempo extra para utilizar a bicicleta, podendo ser em viagens futuras (Vélib', 2015). A bicicleta é reforçada para resistir um grande número de viagens, e contém *chips* que analisam sua condição e comunicam à central caso verifique algum erro (Nadal, 2007).

Outras mudanças no trânsito de Paris, como redução da velocidade máxima de vias, faixas exclusivas para ônibus e criação de ciclovias, redefiniram o transporte da cidade e impulsionaram o sucesso do Vélib. Por isso Paris é hoje uma referência no assunto (Nadal, 2007).

O sistema NYU Bike Share, que tem aproximadamente quatro mil cadastrados, funcionando com 80 bicicletas e 13 estações na Universidade de Nova York, começou com duas alunas de graduação realizando pesquisas e testes de viabilidade do sistema. O programa é predominantemente operado por estudantes que trabalham no escritório de sustentabilidade da universidade. As bicicletas são gratuitas para os estudantes e funcionários da universidade, os quais precisam fazer um cadastro prévio no *site* do sistema. No próprio *site* é possível encontrar o mapa com a localização das estações e o número de bicicletas disponíveis em cada uma. O sistema dispõe várias dicas de segurança que podem ser relevantes para os ciclistas (NYU Bike Share, 2015).

Nova York tem um grande sistema de compartilhamento de bicicleta, entretanto o NYU Bike Share é um sistema separado que visa melhorar o transporte dentro da universidade (NYU Bike Share, 2015).

1.5 Exemplos de sistemas brasileiros

Para se aproximar à realidade brasileira é importante ressaltar alguns sistemas nacionais. Com essa finalidade destacam-se o Bicicleta Livre, SAMBA e o Bivicates.

O sistema que funcionou na Universidade de Brasília de 2009 a 2012, Bicicleta Livre, consiste em disponibilizar bicicletas pintadas de amarelo identificadas pelo BL no Campus Darcy Ribeiro. Essas bicicletas eram de livre acesso a qualquer pessoa que estivesse interessada a utilizá-las dentro do Campus. O BL não tinha apoio financeiro fixo da Universidade nem de nenhum outro órgão, logo as fontes de renda eram escassas e limitadas a alguns editais de apoio a projetos inovadores e ecologicamente sustentáveis. Para sustentar o programa, as bicicletas eram adquiridas por meio de doações e restauradas pelos estudantes que participavam do projeto. As bicicletas ficavam soltas, e muitas foram deterioradas e

algumas foram furtadas. O trabalho de restauração ficou muito desgastante para os alunos, que não conseguiram manter todas as bicicletas em condição de uso, o que tornou o sistema insustentável.

O primeiro sistema de compartilhamento de bicicletas automatizado do Brasil é conhecido como SAMBA. O sistema foi lançado em 2011 pela parceria da prefeitura com o Banco Itaú, e opera por meio de concessão, pela empresa privada Serttel. As estações trabalham com energia solar e estão conectadas por meio de rede sem fio, via rede GSM e 3G. O usuário utiliza *site* para se cadastrar, e tem acesso ao mapa com todas as estações. A bicicleta pode ser retirada utilizando o telefone celular ligando para central de atendimento, ou utilizando o aplicativo do sistema. A empresa Serttel tem vencido licitações em várias cidades do Brasil para instalar sistemas com funcionamento similar ao Bike Rio, como por exemplo, em Brasília (Bike Rio, 2015).

Bicivates é o sistema de compartilhamento de bicicletas que atende exclusivamente à Unidade Integrada Vale do Taquari de Ensino Superior (Univates). As bicicletas não contêm nenhum sistema automatizado, o que reduz os gastos do sistema. A identificação do usuário é feita na liberação da chave, que é necessária para retirar a bicicleta da estação. O Bicivates dispõe de três estações e 120 bicicletas, sem custo extra, aos alunos, professores e funcionários, que somam 15 mil no centro universitário. O sistema é custeado e gerenciado pela própria Univates, que é uma instituição de ensino particular. O sistema conta ainda com um projeto futuro de ciclovias, aumentando a segurança e garantindo passeios mais tranquilos (Bicivates, 2015).

2. MÉTODO

A pesquisa de demanda declarada e caracterização dos possíveis usuários para o sistema de compartilhamento foi realizada por meio de questionário online na plataforma “SRVEY - Academic Surveys System”.

2.1 Procedimentos de coleta de dados

O questionário online contém 32 perguntas divididas em quatro grupos: Socioeconômico; Acesso aos meios de transporte, Análise de viagens; e Sistema de Compartilhamento de Bicicletas.

Cada grupo de perguntas explorou características diferentes do entrevistado. Segue o detalhamento de cada grupo de perguntas na Tabela 2.

2.2 Amostras

Foram obtidas 519 respostas completas do questionário respondidas por frequentadores da UnB. Os dados mostram que o questionário alcançou principalmente os estudantes de graduação (82.25%), com uma porcentagem um pouco superior do sexo masculino

(54.72%). A média de idade foi de 23.74 anos e desvio padrão de 7.63, compatível com a idade dos alunos de graduação.

3. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Através dos resultados obtidos através do questionário foi possível destacar os dados mais relevantes que mostram qual deve ser público alvo do SCB e suas características.

Grande maioria dos entrevistados possui carteira de motorista de carro (70.52%); a maioria dos entrevistados (69.66%) não possui carro próprio, porém 46.63% do total deles afirma ter carro em sua residência. Desses que possuem carro próprio ou possuem carro em sua residência, 55.50% utiliza o veículo automotivo mais de três vezes por semana. Já no caso das bicicletas observa-se o oposto: 49.13% do total afirma ter sua bicicleta própria, entretanto dos que tem acesso à bicicleta somente 37.53% afirma utiliza-la mais de três vezes por semana.

Nos deslocamentos para o Campus Darcy Ribeiro o meio de transporte predominante é o transporte público (58.77%), seguido de 37.96% dos usuários que utilizam automóveis e 18.50% que utilizam a bicicleta.

Tabela 2. Grupos do questionário

| | |
|---|---|
| <p>Socioeconômico: Visou delimitar o perfil do entrevistado, com as perguntas sobre: Gênero; Idade; Vinculo com a Universidade: Departamento ou órgãos de vinculo; Renda familiar; Local onde reside; Possui carteira de habilitação.</p> | <p>Acesso aos meios de transporte Pretendeu identificar o acesso de cada frequentador da UnB aos diferentes meios de transporte. As perguntas foram: Possui carro, moto ou bicicleta em casa e qual desses utiliza em seu dia a dia, além do acesso ao meio de transporte público.</p> |
| <p>Análise de viagens Buscou indicar como os estudantes se locomovem para a universidade e internamente a ela. As perguntas foram: Qual período vai para UnB; Como vai para UnB e como se locomove internamente ao Campus; Motivos de não ir de bicicleta para universidade; Quais são os principais deslocamentos interno ao Campus; Fatores que mais influenciam na escolha do modal nos deslocamentos internos.</p> | <p>SCB (Bicicleta Livre) Foco foi estimar a demanda para o sistema de compartilhamento de bicicletas no Campus Darcy Ribeiro e o perfil do usuário. As perguntas foram: Utilizaria o SCB com base em seus deslocamentos atuais e quantos dias utilizaria; Quais locais são prováveis pontos de instalação de estações do SCB; Fatores que desencorajam e estimulam o uso do sistema; Quanto está disposto a pagar para utilizar o sistema.</p> |

Nos deslocamentos internos ao Campus Darcy Ribeiro o meio de transporte predominante é a caminhada: 91.14% utiliza dessa prática, seguido de 21.58% dos usuários que utilizam automóveis, 14.50% usufruem da carona e 12.72% utilizam a bicicleta.

Os entrevistados declararam que os fatores que mais influenciam na escolha do meio de locomoção internamente ao campus são principalmente a agilidade, em seguida os custos, a acessibilidade e o conforto.

Para responder à principal pergunta da pesquisa, sobre a existência de uma demanda para o sistema de compartilhamento de bicicletas, usaram-se os questionários trás dados que comprovam a demanda. Também indicam os locais onde devem ser instaladas as estações das bicicletas, como vemos na Tabela 3 e Tabela 4 e na Figura 7.

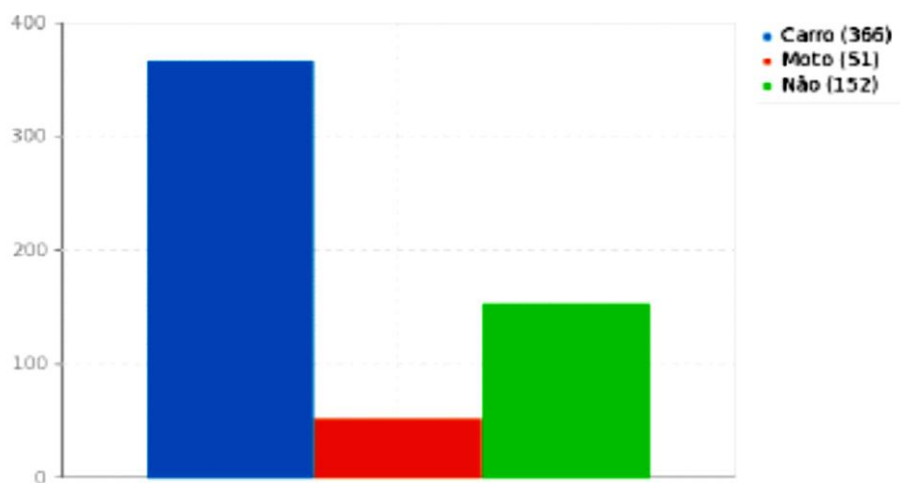


Figura 4. Possui carteira de motorista ou de moto

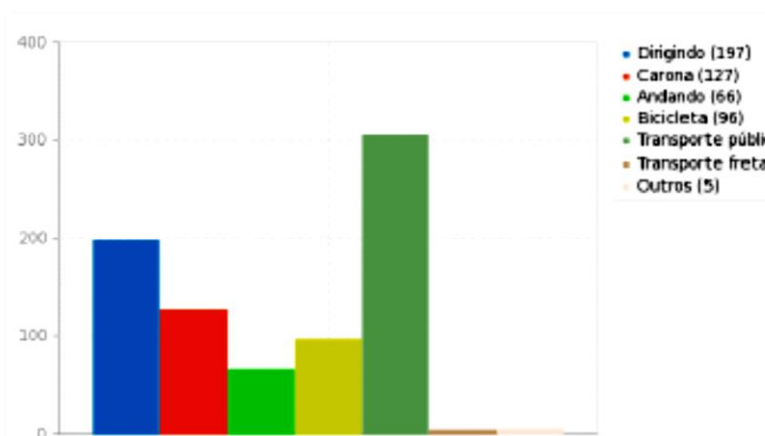


Figura 5. Modo de transporte que utiliza para ir a UnB

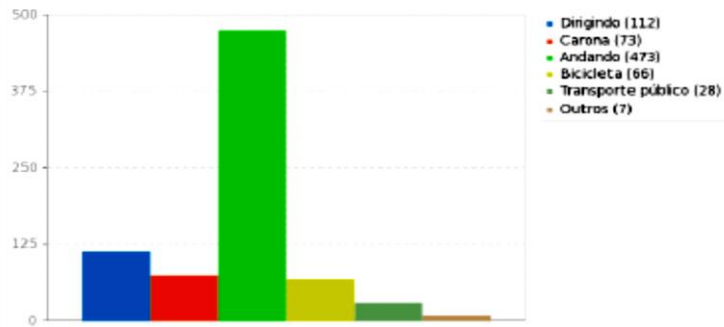


Figura 6. Como se desloca dentro da UnB

Tabela 3. Utilizaria o SCB?

| Resposta | Porcentagem |
|----------|-------------|
| Sim | 79.38% |
| Não | 6.36% |
| Talvez | 14.26% |

Tabela 4. Quais locais instalar as primeiras estações do sistema. (Principais locais)

| Resposta | Contagem | Porcentagem |
|---|----------|-------------|
| Biblioteca Central | 291 | 56.07% |
| Instituto Central de Ciências – Ponta Norte | 196 | 37.76% |
| Restaurante Universitário | 188 | 36.22% |
| Instituto Central de Ciências – Ponta Sul | 180 | 34.66% |
| Parada de ônibus | 123 | 23.70% |
| Centro Olímpico | 113 | 21.77% |

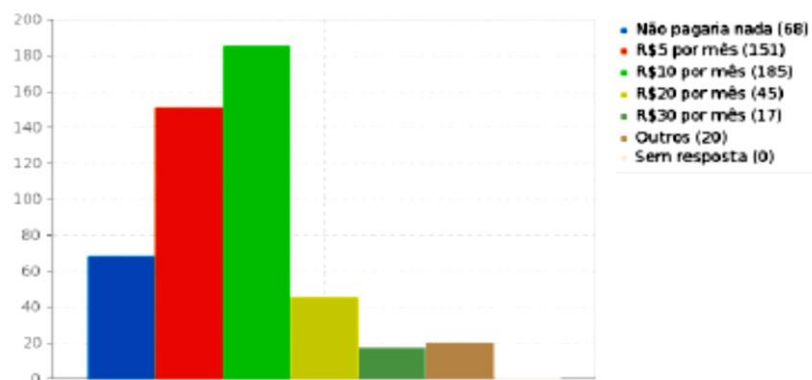


Figura 7. Quanto os usuários estão dispostos a pagar para utilizar o SCB

Com isso é possível observar a grande demanda para o sistema e sua concentração em volta do Instituto Central de Ciências (ICC) com foco na Biblioteca Central dos Estudantes (BCE) e no Restaurante Universitário (RU), locais que estão mais próximos da rotina da maioria dos frequentadores do Campus. Outro ponto que se destaca é o Centro Olímpico, uma região

afastada do cotidiano da maioria dos frequentadores da UnB, que será mais integrada com a implantação do SCB.

Como esperado, a disponibilidade de pagar para utilizar o sistema de compartilhamento é um valor relativamente baixo: 83.13% não estão dispostos a pagar mais de 10 reais ao mês para utilizar o sistema.

Através dos resultados foi possível identificar o perfil dos usuários e características importantes, como estações bem localizadas, ou seja, reduzindo o máximo os deslocamentos a pé até as estações. Visto pela grande quantidade de pessoas que utilizam do transporte público para ir até a UnB, é de grande importância que as estações fiquem localizadas próximas dos principais pontos de parada de ônibus.

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados da pesquisa mostram que o SCB é viável na Universidade de Brasília, além de ser uma alternativa ao uso do automóvel na circulação interna ao Campus. Os resultados servem como suporte para a criação do SCB especialmente na UnB, mas podem ser utilizados em outras universidades com as devidas adequações.

Os usuários muitas vezes por não serem ciclistas experientes necessitam de uma boa infraestrutura cicloviária, bem sinalizada e com mínimo confronto com automóveis possível. Importante ressaltar que a implantação desse sistema não deve ser feita de maneira isolada; é necessário realizar mudanças na infraestrutura cicloviária e nas atividades educativas tanto para ciclistas quanto para os motoristas e pedestres.

Para próximas pesquisas recomenda-se uma elaboração de questionários de maneira qualitativa e criar uma matriz origem-destino para melhor caracterizar os deslocamentos dentro do campus e com isso principais pontos de demanda para o sistema. Também, realizar levantamento detalhado de formas de obtenção de renda e gastos do sistema, para obter maneiras de financiar o sistema.

Esse projeto terá sua continuidade em outros trabalhos, buscando a implantação do SCB na Universidade de Brasília.

4.1 Contribuições

Uma contribuição adicional deste trabalho é apresentar algumas maneiras de obter renda para financiar a implantação do SCB. O projeto tem como alvo ser gratuito ou cobrar taxas simbólicas dos usuários; isso significa que esse sistema de compartilhamento de bicicleta não se sustenta economicamente. Entretanto, o sistema atrai investimento público e privado; com isso é possível arrecadar verba de diferentes formas, como é visto nos exemplos de sistemas citados acima. Algumas maneiras de capitalização de recursos que são compatíveis

à realidade universitária são:

- Verba universitária: uma porcentagem da verba da universidade é destinada ao transporte, como, por exemplo, para manter micro-ônibus circulando o campus. A universidade pode repassar uma quantia para o Sistema de Compartilhamento de Bicicletas. Para isso é necessário apresentar um projeto detalhado à administração, mostrando que o SCB é vantajoso.
- Venda de propaganda: como o SCB representa uma alternativa ecológica, algumas empresas têm interesse em ter seu nome associado ao sistema. A propaganda geralmente é colocada nos bicicletários e nas próprias bicicletas; além disso, como no exemplo do Vélib', é possível, com a autorização da universidade, criar novos pontos de propaganda e assim aumentar a arrecadação.
- Concorrer em editais: existem editais de programas de desenvolvimento e inovação que oferecem verba para apoio de alguns projetos ganhadores. O projeto de instalar o SCB na UnB pode concorrer em editais disponibilizados por órgãos governamentais ou por programas que envolvem à universidade.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), nosso patrocinador. Ao Grupo de Pesquisa Comportamento em Transportes e Novas Tecnologias (GCTNT), através do Programa de Pós-Graduação em Transporte. Ao Coletivo Bicicleta Livre (BL), pelo apoio.

REFERÊNCIAS

- BICIVATES (2015). <www.univates.br/transporte/bicivates>. Acessado em: 04 de março 2015.
- BIKE BRASÍLIA (2015). <www.mobilicidade.com.br/bikebrasil>. Acessado em: 04 de março.
- BIKE RIO (2015). <www.mobilicidade.com.br/bikerio.asp>. Acessado em: 04 de março 2015.
- BRASIL (2007). *Programa brasileiro de mobilidade por bicicleta - bicicleta brasil*. Brasília: Ministério das Cidades.
- DEMAIO, P. (2009). *Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future*. Journal of Public Transportation.
- FEITOSA, Z. O. (2010). *Competição por espaço em estacionamento público: invasão, reações e justificativas diante de vagas reservadas*. Dissertação de Mestrado no Instituto de Psicologia. Universidade de Brasília.
- FISHMAN, E. (2015). *Bikeshare: A Review of Recent Literature, Transport Reviews*. DOI: 10.1080/01441647.2015.1033036.
- GARCÍA-GUTIÉRREZ, J.; INIESTA, J. G. Y TORRES, J. J. (2014). *Dimensioning of a Bike Sharing System (BSS): A study case in Nezahualcoyotl, Mexico*. 18º Congresso Panamericano de Engenharia de Trânsito e Transporte e Logística.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION & DEVELOPMENT POLICY, ITDP. (2014). *The bike share planning guide*.

MACHADO, F. R.; CÉSAR, Y. B.; PAZ A.; RAMOS, D. (2011). *Bicicleta Livre: Pesquisa, Ação e Extensão*. Brasília. Decanato de Extensão da Universidade de Brasília.

MALATESTA, M. E. B.; AUGUSTO, M. L.; GONÇALVES, J. F; HAASE, D. I.; NEGRÃO, E. J. M. (2013). *Bike Sampa – Bike Sharing em São Paulo e sua adaptação à realidade urbana paulistana*. Brasília: 19º Congresso Brasileiro de Transporte e Transito.

MEDDIN, R. Y DEMAIO, P. (2015). *The Bike-sharing World Map*. <www.bikesharingmap.com>. Acessado em: 06 de dezembro 2015.

NADAL, L. (2007). *Bike Sharing Sweeps Paris Off Its Feet. Sustainable Transport Magazine*. (pp. 8–12). New York: ITDP.

NYU BIKE SHARE (2015). <www.nyu.edu/sustainability/campus.projects/bike.share/index.php>. Acessado em: 30 de julho 2015.

UNB (2015). <www.unb.br/noticias/downloads/Campus%20Darcy%20Ribeiro.pdf>. Acessado em: 30 de maio 2015.

VÉLIB' (2015). <<https://aboen-paris.cyclocity.fr/>>. Acessado em: 30 de maio 2015.

11 Identification of potential cyclists in a university campus

Marcos Antonio Garcia Ferreira

Suely da Penha Sanches

Federal University of São Carlos, Brazil

ABSTRACT

The objective of this study is to outline the profile of a group of undergraduate students in order to identify those who are more likely to adopt the bicycle as their mode of transport to access the campus. The Transtheoretical Behavior Change model, used for the survey, was capable of highlighting the potential for modal change, helped to identify target groups for specific strategies and provided an understanding of how the transition to cycling would occur. The results showed that most students (77%) could be encouraged to change their travel behavior if adequate conditions for cycling were offered, mainly an adequate cycle network and end-of-trip facilities.

Keywords: Potential cyclists; Transtheoretical Behavior Model; campus mobility; policies to increase cycle use

1. INTRODUCTION

The internal mobility policy in most of the Brazilian college campuses has favored motorized transport (cars and buses) over active modes (pedestrians and cyclists). In order to propose a transport policy for the campus, coherent with the principles of sustainability, it is necessary to understand the range of factors that an individual takes into account when deciding which mode of transport to use.

Some mobility management strategies have been tried by Brazilian universities with the aim of reducing motor vehicle impacts like congestion, shortage of parking spaces and pollution. However, these efforts will succeed only if the reasons that motivate behavioral changes are considered and deal with.

Motivation for change may be analyzed by studying the individual's behavior in relation to his willingness to modify habits that have been acquired throughout life. The knowledge of human behavior requires a complex study, involving numerous variables that may influence people control actions.

The literature presents several models for analyzing behavioral change. For this research, the Transtheoretical Model of Behavior Change (Prochaska and DiClemente, 1984) was used because it has been applied to several other areas of study, besides health. The model

is based on the premise that behavior change is a process that has several stages of promptness to change.

In this perspective, the objective of this study is to identify the segments of students in a Brazilian university that are prepared to change their behavior with respect to adopting the bicycle as the mode of transport to access the campus. Therefore, based on the stages of behavioral change, it may be possible to indicate mobility strategies that will stimulate the use of bicycles for trips to the campus.

2. MOBILITY IN UNIVERSITY CAMPUSES

According to Balsas (2002) the organizational structure of university campuses is similar to the ones found in cities. Universities may be regarded as "small societies" capable of building ethnic and cultural standards. Thus, the campus is an important setting for initiatives aimed at encouraging the use of active modes.

University students constitute a segment of individuals suitable to be a multiplier of the benefits of cycling as a mode of transport. Besides serving as an example to the general population, habits practiced during youth may be continued during adulthood (Shannon et al., 2006).

Many universities around the world have created an active commuting culture on campus (known as Green Campus) by implementing comprehensive strategies that increase the convenience of active modes and, at the same time, reduce the convenience and cost effectiveness of driving. This movement also led to numerous studies to be published about mobility in university campuses.

The University of Western Australia, UWA in order to understand the potential of the academic community to adopt active modes to access the university, applied an online questionnaire based on the Transtheoretical Model (Shannon et al., 2006). The UWA survey results demonstrated that reducing barriers is likely to be more effective than promoting the benefits of active modes.

Miller (2007) conducted a survey at the Graduate School of Clemson University in the United States designed to identify factors that would encourage the use of non-motorized modes of transport. The results showed that infrastructure improvements were the main incentive for the students to use the bicycle.

A survey, conducted by Whalen (2011) at McMaster University in Hamilton, Canada, also attempt to understand which factors exerted a greater influence on the decision of students in adopting some active modes of transport to access the university. The study showed that (1) travel time directly affects the choice of the modes of transport (2); implementation of

measures restricting to use the cars, as well as the provision of better infrastructure for active modes may be a positive influence for using the bicycle or walking.

In order to define strategies that might improve the accessibility in the campus of the Federal University of Rio de Janeiro, Parra (2006) applied a questionnaire based on the concept of Mobility Management. It was verified that the measures that would improve mobility within the campus and better coexistence between different forms of transport were (1) improvement of pedestrian infrastructure (2); integration between different modes of transport and (3) marketing campaigns to encourage the use of public transportation and the ridesharing.

A study was developed by Stein (2013) in the University of São Paulo, campus of São Carlos with the objective of identifying the barriers and motivation for the use of sustainable modes of transport. The survey showed that (1) the campus population was willing to use sustainable modes (2); automobile ownership was the main deterrent for the use of non-motorized modes and (3) in order to increase the use of bicycles, it was necessary to implement bike paths and bike lanes linking the campus to the city, as well as the construction of bicycle parking (racks and locks).

3. METHOD

The literature presents several models that focus on the behavioral changes of an individual (Ajzen, 1991; Aarts et al., 1997; Bamberg et al, 2003; Verplanken and Aarts, 1999). For this research, the Transtheoretical Model of Behavior Change (Prochaska and DiClemente, 1984) has been used.

Most researches that used this model were developed in the areas of health and physical activity, but some researchers have applied the model in transportation studies and, more specifically, in studies related to the option for the bike (Gatersleben and Appleton, 2007; Nkurunziza et al., 2012; Shannon et al., 2006; Grau, 2015).

The Transtheoretical (or Stages of Change) model deals with intentional changes of behavior. The basic elements of the model, according to Prochaska and DiClement (1984), are both motivational (dealing with intention building, decision making and attitudinal readiness) and behavioral (the adoption process from stages of increased motivation, through tentative performance to regular practice of the behavior).

According to the model, changes in the behavior occur in six successive stages:

1. Pre-contemplation - the individual does not recognize the problem and does not consider the need for changes in his behavior.
2. Contemplation - the individual begins to consider the problem and starts thinking about changes.

3. Prepared for action – the stage where the commitment to the changes begins to be built.
4. Action - when attempts to change are put into practice.
5. Maintenance - the moment of attaining the successful behavioral change.
6. Relapse – at this point, the individual may return to a previous stage.

The first two stages: Pre-contemplation (no intention to change) and Contemplation (growing intention), are motivational stages without actual performance of the behavior. The next two: Preparation (strong intention and possible irregular or tentative performance of the behavior) and Action (recent initiation of regular behavior), bring a decisive shift into behavioral manifestation. The Maintenance stage represents the establishment of permanent behavior and the final stage (Relapse) may happen if the individual returns to his previous behavior.

The model suggests that behavior change processes occur in successive stages and that movement through these stages is neither unitary nor linear but rather, cyclical, involving a pattern of adoption, maintenance, stagnation, relapse, and re-adoption over time (Prochaska and Diclemente, 1984).

3.1. Data

Data for the study were obtained from a questionnaire applied to undergraduate students of the Federal University of São Carlos (UFSCar) in São Carlos, SP - Brazil, a medium-sized city of about 240,000 inhabitants. The university is located in a peripheral area of the city and has approximately 8,500 undergraduate students. There is no proper infrastructure for bicycles (bike lanes or tracks), both in the access roads and within the campus.

The questionnaire consisted of four blocks:

1. Respondent characteristics
Gender and distance from residence to the campus and modes of transport most frequently used.
2. Reason for choosing the current modes of transport
Twelve items with response options ranging from "very unimportant" (coded as 1) to "very important" (coded as 5): economy, exposure to sun and rain, comfort, convenience, road safety, time independence, personal safety, health, having to move around the campus, free parking on campus, public transportation far from home and living near the campus. Larger response values mean the reason is more important.
3. Perceived barriers for bicycle use
Seven items with response options ranging from "very unimportant" (coded as 1) to "very important" (coded as 5): lack of cycling infrastructure, lack of safe bicycle parking on campus, risk being hit by a motor vehicle, exposure to sun and rain, need to access the campus at night, travel time and distance from residence to the campus. Larger response values indicate the barrier is stronger.

4. Policies to stimulate bicycle use

Five possible interventions were presented to the polled students, with response options ranging from 1 (no chance of using the bike if the policy was implemented) to 5 (very likely to use the bike if the policy was implemented): parking fee for cars on campus, more lockers and showers, a bicycle repair shop in the campus, safe bicycle parking, bicycle lanes and paths in the campus. Larger response values imply that the policy would be more effective.

5. Stage of behavioral change

Six statements, among which the polled students should opt for the one that better described his/her current position regarding the use of bicycles: "I do not ride regularly and I do not attempt to ride in the next six months" (pre-contemplation); "I do not ride regularly, but I am thinking about riding in the next six months" (contemplation); "I ride occasionally, but not more than once a week" (prepared for action); "I ride regularly, but started riding only six months ago" (action); "I ride regularly and do so for more than six months" (maintenance) and "I rode until recently, but I stopped riding" (relapse).

4. RESULTS

Data collection resulted in 224 completed questionnaires that were used for the analysis. The general characteristics of the sample are shown in Table 1.

Most of the polled students use the car as driver or passenger (36%) and also a significant portion (28%) use the bus to access the campus. Travel distance does not seem to be a barrier for the use of bicycles, because 87% of the polled students live within 5 km of the campus.

When asked if they were willing to change the modes of transport, 77% of the polled students answered yes. Table 2 shows the modes that would be adopted by these individuals.

According to the data in Table 3, bike would be the mode of transport adopted by more than half of those who are interested in a possible change. This is an interesting result because it points to a restrained demand that would be willing to cycle if given adequate conditions.

4.1. Stages of behavioral change

Table 3 shows how the polled students were classified into the six behavioral change stages.

The profile of each segment (in terms of socio-demographic characteristics and attitudes towards bicycle use) may provide a basis for identifying potential cyclists.

Table 1. General characteristics of the sample

| | |
|--|---|
| Gender: Female: 113 (51%) Male: 111 (49%) | Main transportation mode: Car - driver: 58 (26%) Car – ride: 22 (10%) Motorcycle: 9 (4%) Bus: 65 (28%) Bicycle: 35(16%) On foot: 35 (16%) |
| Distance from home to campus: ≤ 1.5 km: 9 (4%) 1.5 – 5.0 km: 186 (83%) > 5 km: 29 (13%) | |

Table 2. Modes of transport that would be adopted in an eventual change

| Mode that would be adopted | Number of polled students (%) |
|----------------------------|-------------------------------|
| Car driver | 28 (16%) |
| Car - ride | 10 (6%) |
| Motorcycle | 15 (9%) |
| Bus | 9 (5%) |
| Bicycle | 88 (51%) |
| On foot | 22 (13%) |

Table 3. Distribution of polled into the stages

| Stage of behavioral change | Number of polled students (%) |
|----------------------------|-------------------------------|
| Pre-contemplation | 53 (24%) |
| Contemplation | 76 (34%) |
| Prepared for action | 21 (9%) |
| Action | 11 (5%) |
| Maintenance | 41 (18%) |
| Relapse | 22 (10%) |

The following section describes each segment including:

- How important are the reasons for choosing the current modes of transport. Response options ranged from "Very unimportant" (1) to "Very important" (5). Therefore, the highest is the value, the greatest the importance attached to reason.
- What are the barriers they perceive for bicycle use. Response options ranged from "Very unimportant" (1) to "Very important" (5). Thus, higher values indicate the barrier is more important.
- How they would react to different policies, which is an important indication of the effectiveness of interventions. Five feasible policies to foster bicycle use were presented to polled students, with response options ranging from 1 (no chance of using the bike) to 5 (very likely to use the bike). Thus, higher values indicate greater likelihood that the individual consider the use of bicycles to access the campus if the intervention is

implemented.

4.1.1. Pre-contemplation

About a quarter of the polled students (24%) were classified in the pre-contemplation stage (do not ride regularly and do not attempt to ride in the next 6 months). This segment consists of approximately equal shares of men (51%) and women (49%), and are mainly (57%) automobile users. Figure 1 shows the importance of the reasons for using the current modes of transport.

The results shown in Figure 1 indicate that the individuals in the “Pre-contemplation” stage favor aspects related to economy, health and environment concern when choosing their modes of transport. For this group, exposure to sun and rain is the strongest barrier for using the bicycle, but all the other possible barriers are also important (Figure 2).

Generally, people that have never considered cycling express a negative attitude towards riding a bicycle. The results show that the only policy that would motivate these individuals to cycle is the provision of bicycle paths and lanes (Figure 3). Other policies did not achieved significant scores (they are all below 3.0) and were not considered very important by polled students. However, this segment may be unresponsive, and policies aimed to it may be less successful.

4.1.2. Contemplation

This is the largest group and comprises 34% of the polled people. Individuals in the "Contemplation" segment (do not ride regularly, but are thinking about starting to ride in the next months). They use the bus (40%) and cars (37%) to access the university and there is no tendency in relation to gender (men and women are equally represented).

People in this group also favor aspects related to economy, health and environment concern when choosing their modes of transport (Figure 4) and, because they have already considered cycling, these people perceive some objective barriers: lack of infrastructure and the fear of being run over by a motor vehicle (Figure 5).

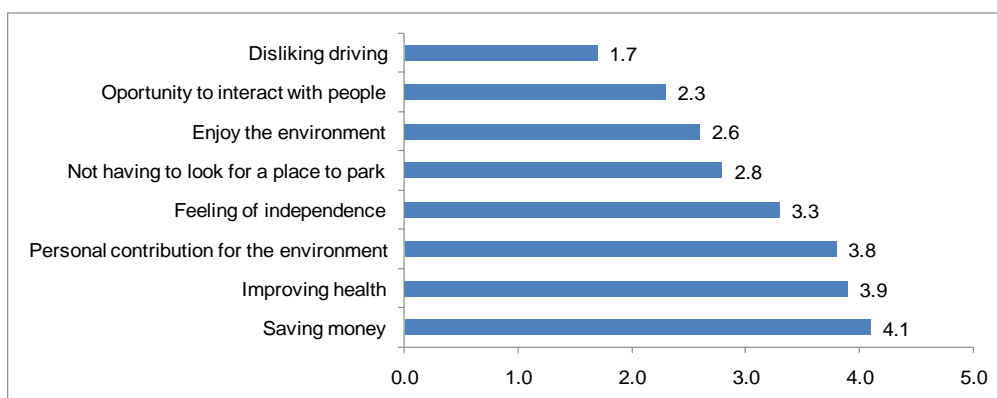


Figure 1. Reasons for using the current modes of transport (pre-contemplation)

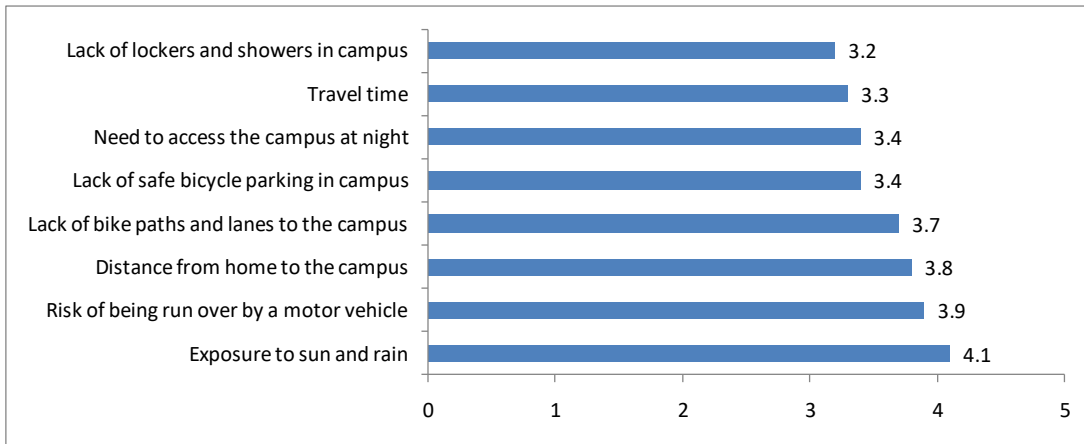


Figure 2. Barriers for cycling (pre-contemplation stage)

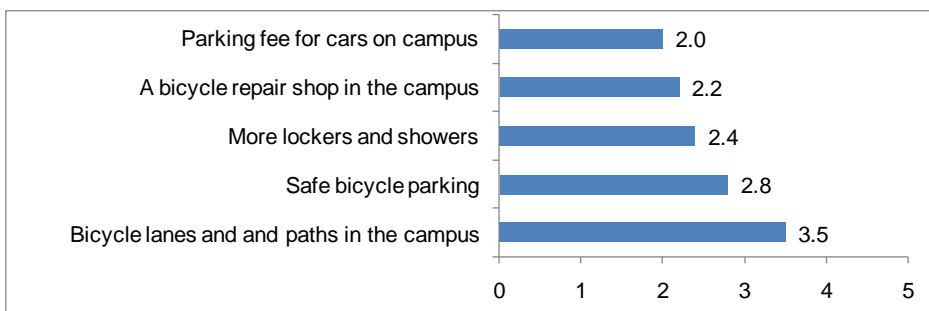


Figure 3. Effectiveness of Policies (pre-contemplation stage)

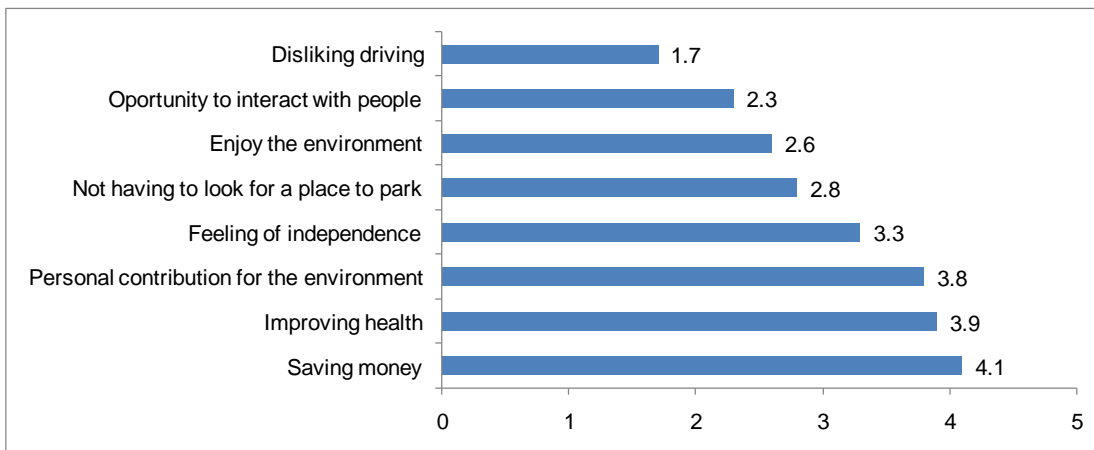


Figure 4. Reasons for using the current modes (contemplation stage)

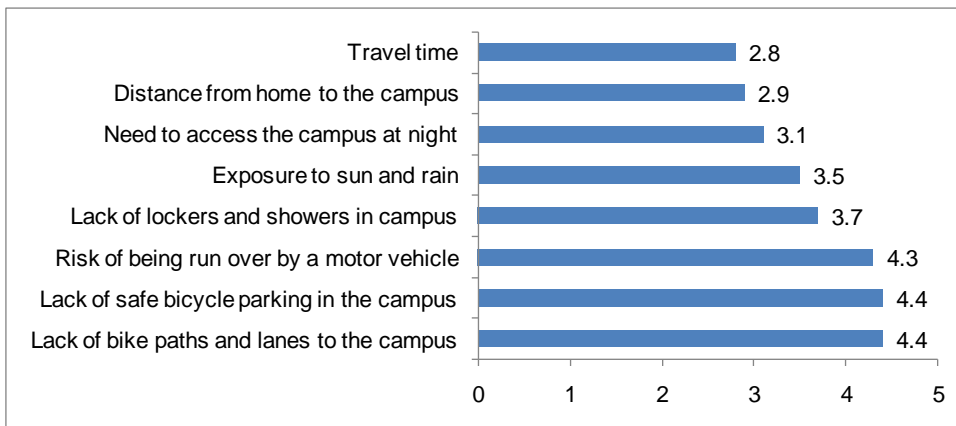


Figure 5. Barriers for cycling (contemplation stage)

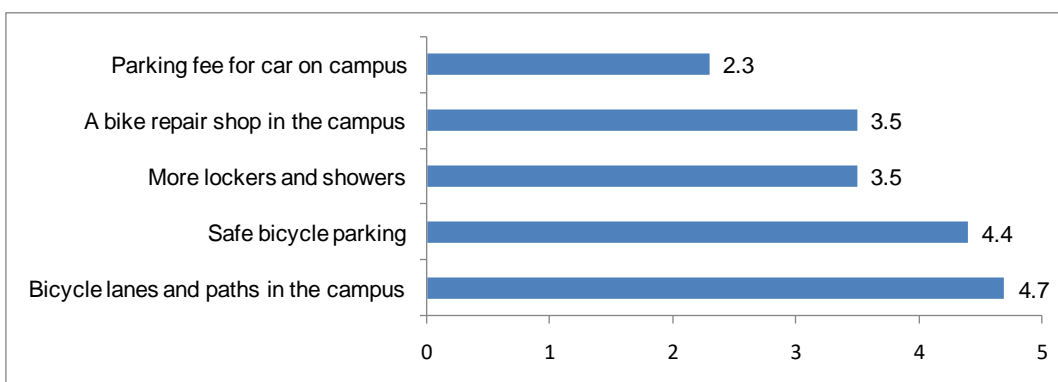


Figure 6. Effectiveness of policies (contemplation stage)

The “Contemplation” segment is likely to be easily motivated, and policies strategies targeted to this segment are more likely to be successful. The survey showed that these individuals may be encouraged by the provision of bicycle infrastructure and safe bicycle parking in the campus (Figure 6).

4.1.3. Prepared for action

The "Prepared for action" segment (ride once in a while, but not more than once a week) is one of the smallest (9% of the polled). In this group, most individuals (43%) use the car to go to campus. The percentage of men (56%) is slightly higher than that of women. This group of people chose the current modes of transport for reasons of economy, health and environment concern (Figure 7) and the main barrier for cycling is also the lack of cycling infrastructure (Figure 8).

People in the “prepared for action” segment may start cycling when proper infrastructure is provided (bike lanes and paths and safe parking). These are the same policy strategies that would encourage the “contemplation” segment (Figure 9).

4.1.4. Action

This is the smallest group (only 5% of polled people). Individuals in the "Action" segment

(ride regularly, but began to ride in the last six months) are mainly bus users (27%) and 54% are men. The reasons for choosing their current modes of transport are, basically, the same as for the previous groups (economy, health and environment concerns) with the addition of the feeling of independence (Figure 10).

For this segment, the main barriers are: lack of cycling infrastructure and the lack of safe bicycle lane on campus. This group already uses the bike, but it is important to emphasize that they also identify barriers that could be eliminated by adequate infrastructure (Figure 11).

The “Action” segment alternates cycling with public transport for accessing the campus. It was found that these people would be motivated to cycle more regularly if bicycle infrastructure is provided, including a bike repair shop in campus (Figure 12).

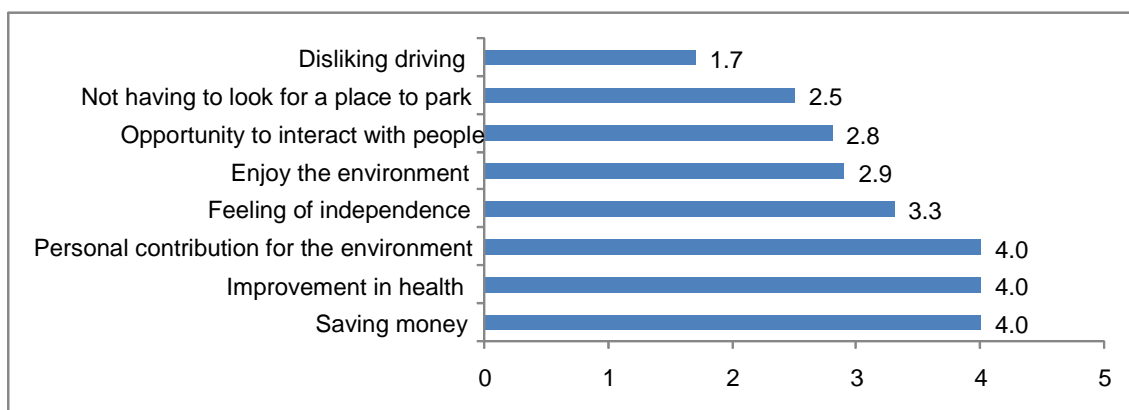


Figure 7. Reasons for using the current modes (prepared for action stage)

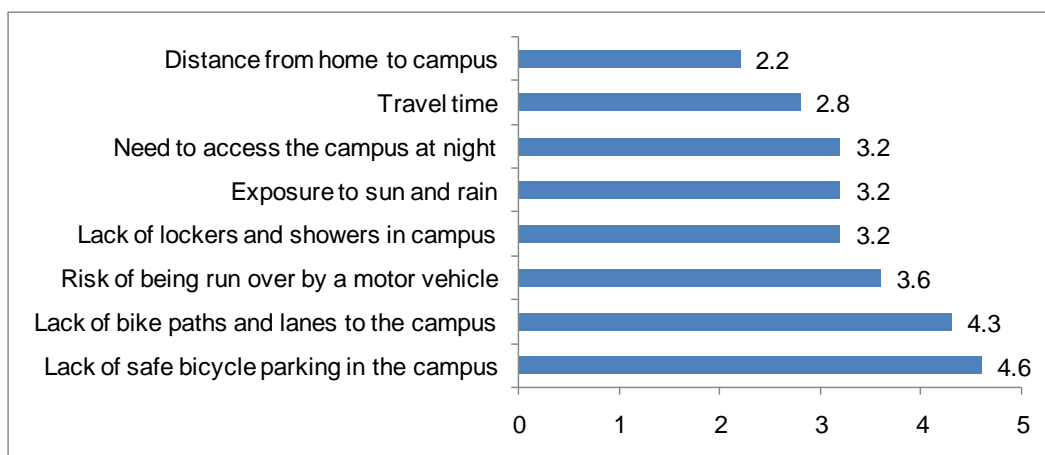


Figure 8. Barriers for cycling (prepared for action stage)

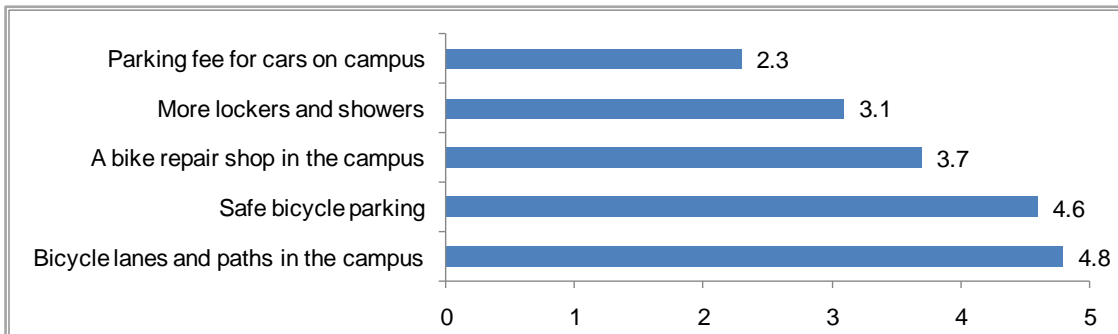


Figure 9. Effectiveness of Policies (prepared for action segment)

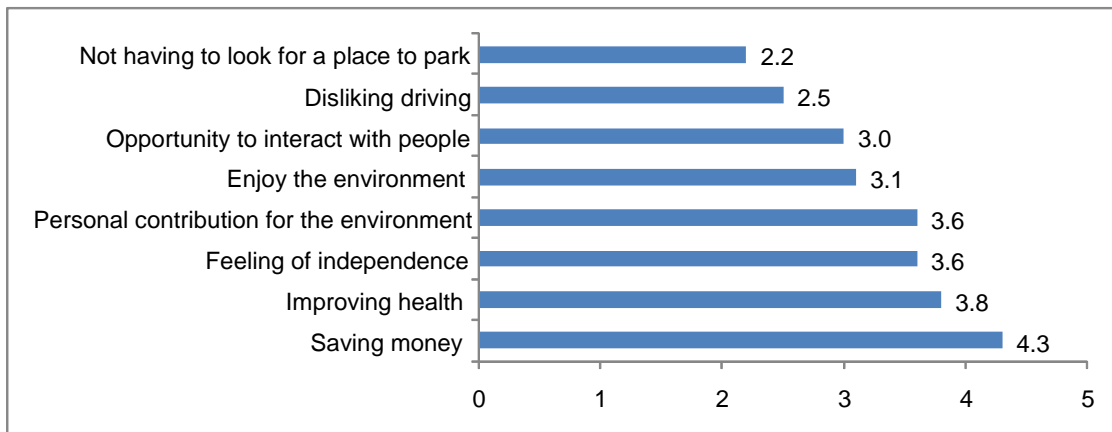


Figure 10. Reasons for using the current modes (action stage)

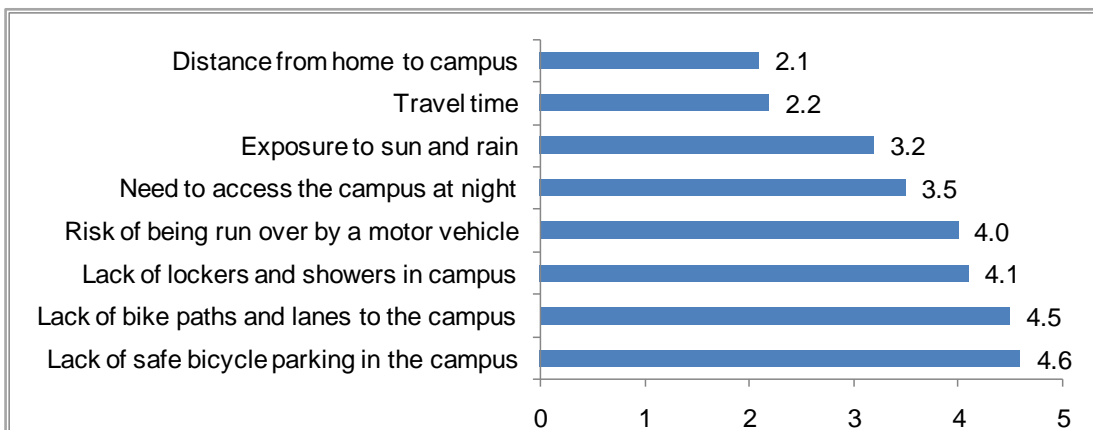


Figure 11. Barriers for cycling (action stage)

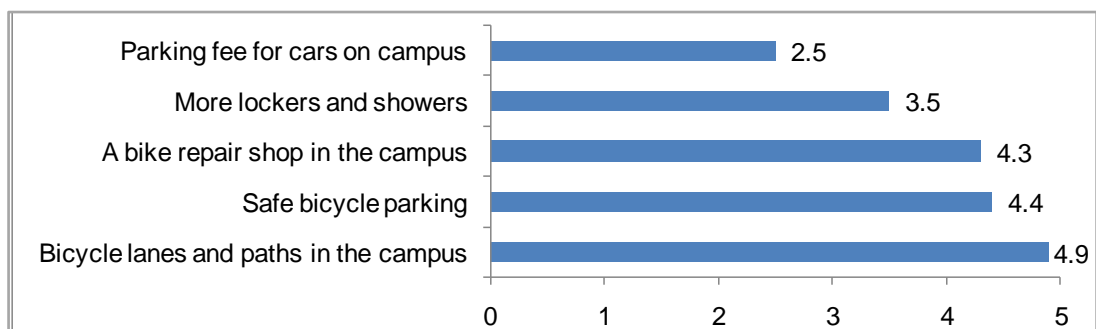


Figure 12. Effectiveness of Policies (action segment)

4.1.5. Maintenance

As expected, the "Maintenance" segment (ride regularly and do so for more than six months) is made up mainly by cyclists (68%) and men (69%). For this group, the reasons for choosing the current modes of transport are the same as for the previous groups: economy, health and environment concerns (Figure 13).

Even though they already use the bicycle, individuals in this group emphasize two important barriers: lack of cycling infrastructure and the lack of safe bicycle parking on campus (Figure 14).

People in the "Maintenance segment" cycle regularly, despite the inexistence of cycling facilities. They might be motivated to cycle more by providing more cycling infrastructure like adequate cycle network and end-of-trip facilities (Figure 15).

4.1.6. Relapse

The "Relapse" segment (rode until recently, but stopped riding) are now mainly bus users (41%) and there is no gender predominance. The reasons they have for using their current modes of transport are: economy and health (Figure 16).

Although this group has a positive view of cycling, the following main barriers were cited: lack of cycling infrastructure and the risk of being run over by a motor vehicle (Figure 17).

A past behavior is a good indicator of future behavior. Persuading those people who already cycled before may be easier than those who have never contemplated cycling. These individuals may be motivated to re-use the bike if proper cycling infrastructure is provided (Figure 18).

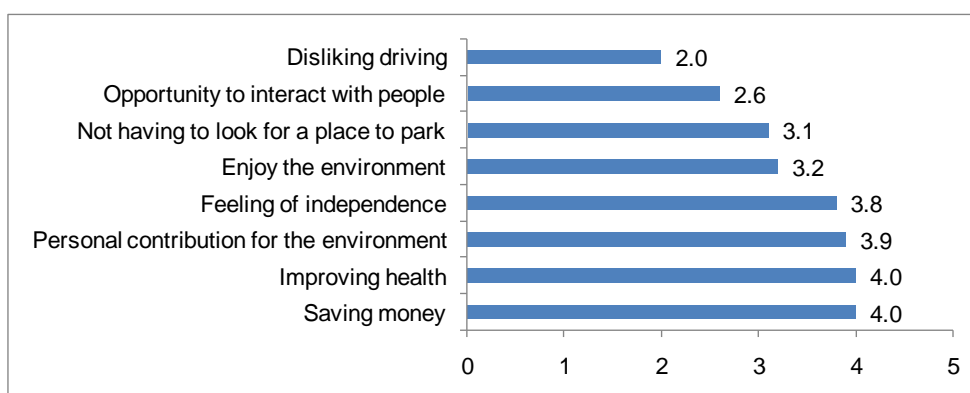


Figure 13. Reasons for using the current modes (maintenance segment)

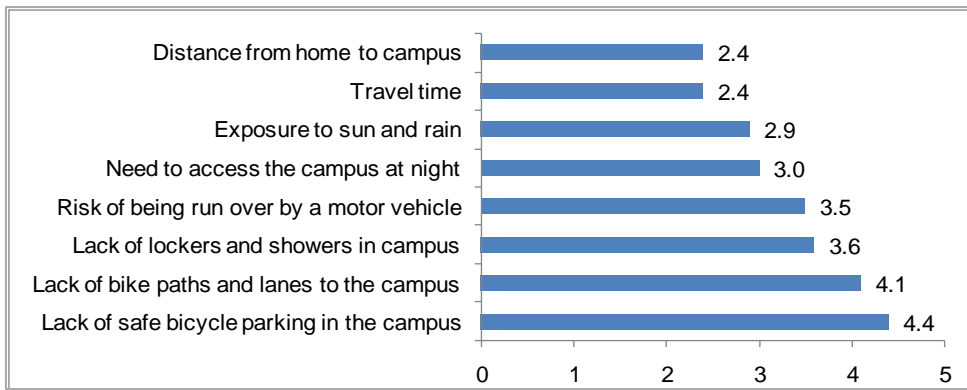


Figure 14. Barriers for cycling (maintenance stage)

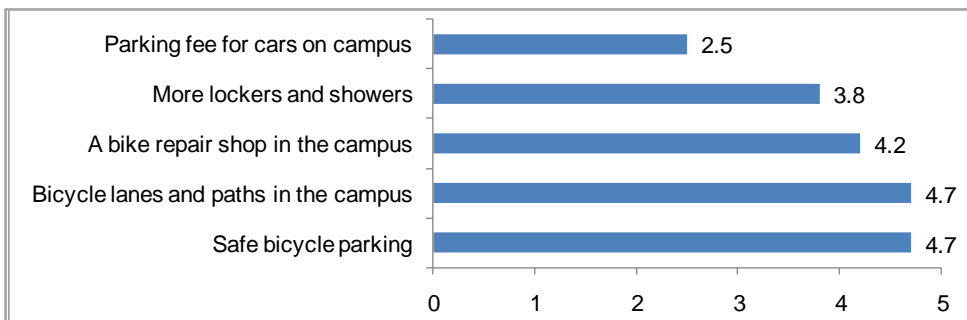


Figure 15. Effectiveness of Policies (action segment)

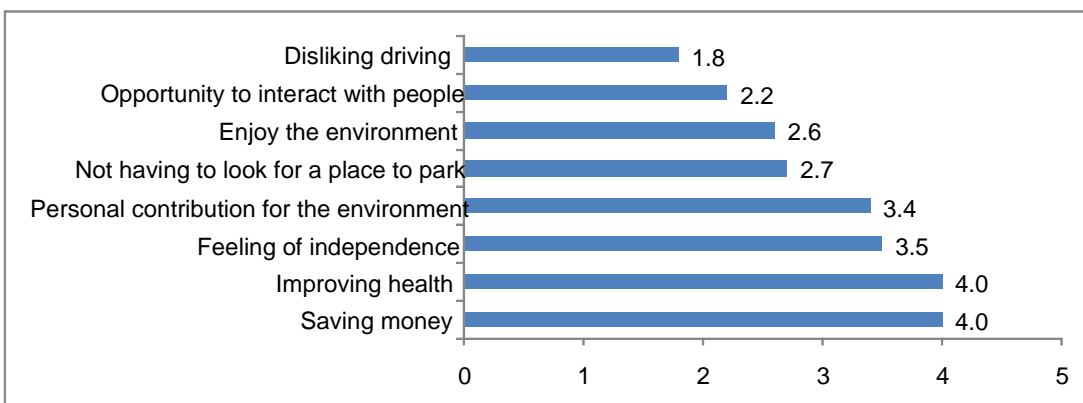


Figure 16. Reasons for using the current modes (maintenance segment)

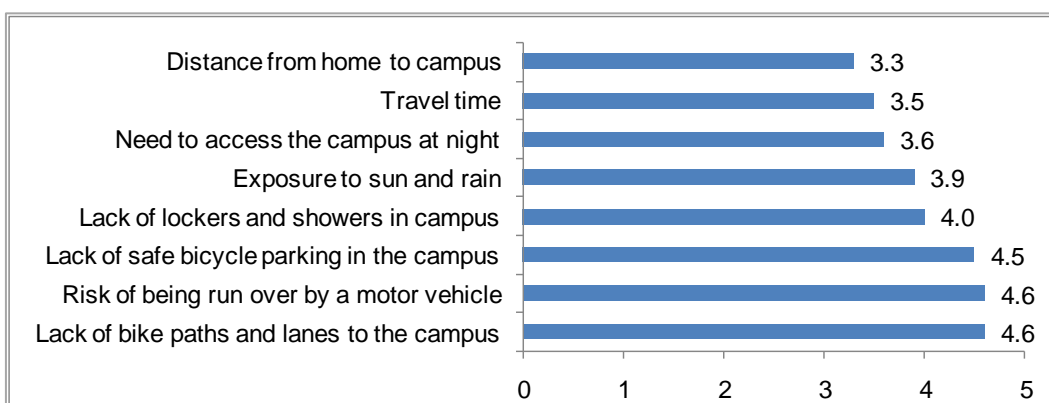


Figure 17. Barriers for cycling (relapse stage)

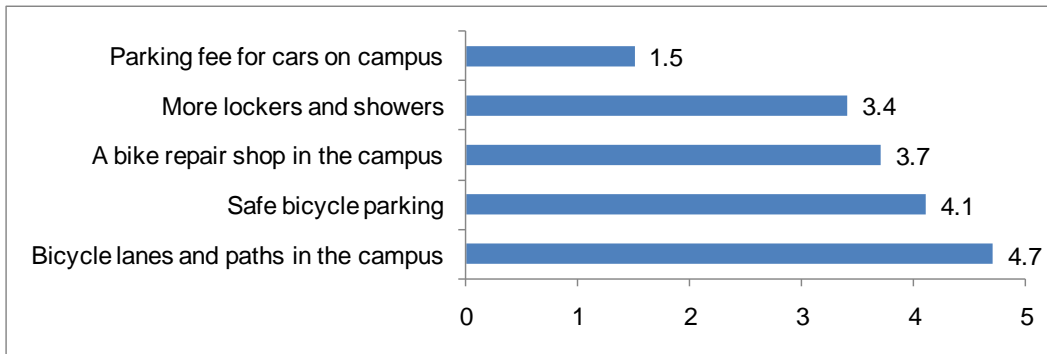


Figure 18. Effectiveness of Policies (action segment)

5. CONCLUSIONS

The objective of this study is to outline the profile of a group of undergraduate students in order to identify those who are more ready to adopt the bicycle as their mode of transport in the campus.

The Transtheoretical Model of Behavior Change, although traditionally associated with health promotion research, was capable of highlighting the potential for modal change and therefore may be very useful in both transportation planning research and policy development. The model helped to identify target groups for specific strategies and provide an understanding of how the transition to cycling would occur.

The results showed that most students (77%) could be encouraged to change their travel behavior if adequate conditions for cycling were offered. When asked to rate the effectiveness of a number of potential strategies to encourage cycling, the provision of infrastructure (cycle network and end-of-trip facilities) was pointed as the most effective.

Behavior change is a slow process which requires constant attention. Even those motivated to cycle need incentive to get started and especially to continue cycling. The experience of using bicycles must be positive for people to continue cycling and especially for attracting potential new cyclists.

The analysis clearly indicated that different strategies, addressing different segments, may be adopted in order to optimize the chance of influencing travel behavior change in the short and long terms.

ACKNOWLEDGMENTS

The findings presented in this paper are part of an ongoing research funded by FAPESP (Fundação para Apoio à Pesquisa do Estado de São Paulo).

REFERENCES

- AARTS, H.; VERPLANKEN, B.; VAN KNIPPENBERG, A. (1997). *Habit and information use in travel mode choices*. Acta Psychologica, 96, 1997: 1-14.
- AJZEN, I. (1991). *The theory of planned behavior*. Organizational Behavior and Human Decision Processes 50, 179-211.
- BALSAS, C. (2002). *Sustainable transportation planning on college campuses*. Transport Policy, v.10, 35-49.
- BAMBERG, S.; AJZEN, I.; SCHMIDT, P. (2003). *Choice of travel mode in the theory of planned behavior: The roles of past behavior, habit, and reasoned action*. Basic and Applied Social Psychology, 25(3), 175–187.
- GATERSLEBEN, B. and APPLETON, M. (2007). *Contemplating cycling to work: attitudes and perceptions in different stages of change*. Transportation Research Part A, 41(4), 302-312.
- GRAU, R. (2015). *Mobilidade Ciclovária em Viagens a Campi Universitários – Estudo de Caso: UFSCAR, São Carlos – SP*. Master Dissertation, Federal University of São Carlos.
- MILLER, B. (2007). *Campus Commuting: Barriers to Walking and Bicycling Use in a University Town*. Master Thesis in City and Regional Planning, Clemson University.
- NKURUNZIZA, A.; ZUIDGEEST, M.; MAASEVEEN, M. (2012). *Identifying potential cycling market segments in Dar-es-Salaam, Tanzania*. Habitat International 36, 2012: 78-84.
- PARRA, M. (2006). *Gerenciamento da Mobilidade em Campi Universitários: Problemas, Dificuldades e Possíveis Soluções no Caso Ilha do Fundão*. Master Dissertation, Federal University of Rio de Janeiro.
- PROCHASKA, J. and DICLEMENTE, C. (1984). *Stages and processes of self-change of smoking: toward an integrative model of change*. Journal of Consulting and Clinical Psychology, v 51, 390-395.
- SHANNON, T.; GILES-CORTI, B.; PIKORA, T.; BULSARA, M.; SHILTON, T.; BULL, F. (2006). *Active commuting in a university setting: assessing commuting habits and potential for modal change*. Transport Policy, v. 13, n. 3, 240-253.
- STEIN, P. (2013). *Barreiras, Motivações e Estratégias para Mobilidade Sustentável no Campus São Carlos da USP*. Master Dissertation, University of São Paulo, Campus São Carlos, 2013
- VERPLANKEN, B. and AARTS, H. (1999). *Habit, attitude, and planned behaviour: Is habit an empty construct or an interesting case of goal-directed automaticity?* European Review of Social Psychology, 10(1), 101-134.
- WHALEN, K. (2011). *Travel Preferences and Choices of University Students and the Role of Active Travel*. Master Thesis, McMaster University, Hamilton, CA.

SECCIÓN 3

MODELOS DE REDES Y EQUILIBRIO OFERTA-DEMANDA DE TRANSPORTE

NETWORK MODELS AND SUPPLY- DEMAND BALANCE FOR TRANSPORTATION

12 Flow-queue-time dependent traffic modelling for urban networks

Gloria Londoño

Universidad Autónoma de la Ciudad de México, México

Angélica Lozano

Universidad Nacional Autónoma de México, México

ABSTRACT

The extension of queues on the paths of daily urban trips is an indicator of a deficient performance of the road network. In order to validate, calibrate and check the analytical relationships among travel time vs queues and flow, it is necessary to obtain information about location, size, extension, time and period of the queue processes.

A procedure to measure, identify, estimate and map queues, by travel-time studies is presented. The information of queue length on arcs of arterials improves the understanding of traffic behavior. A simple procedure to calculate the queue length in arcs, on time or off time, is explained. A case study, on a part of a real network, is presented.

Additionally, a flow-queue-overflow time dependent user equilibrium assignment model is introduced, which considers an Akcelik's time-flow-overflow-queue dependent travel time function.

Keywords: Traffic assignment, equilibrium model, queue.

1. INTRODUCTION

Traffic management in congested cities requires information of performance indicators which guide the decisions of planners, operators and evaluators. They require to know travel patterns and their impact on the efficiency, effectiveness and sustainability of the network.

Some methodologies allow to measure and define traffic variables and parameters, useful to determine quantitative and qualitative levels of service on traffic infrastructure (Manual of Transportation Engineering Studies, TRB, 2010, or Highway Capacity Manual, TRB, 2010). Currently emerging systems such as Big Data in the "smart objects" environment (Hurst and Dobbins, 2015), facilitate the capture, storage and processing of information, and allow to obtain reliable and accurate information with spatial and temporal coverage, cheaper and timely. Hence, researchers and engineers face a challenge, real-time information and comprehensive coverage of the network are required for fast algorithms in order to guide

travelers on their on-time paths. Also, validation, calibration and adjust of models, can be improved by Big Data applied to traffic systems (Burt et al., 2014).

This paper shows as real information can support the functional shape of analytic relationship between travel patterns and queue length, in urban congested networks. Prediction of travel itineraries is studied by means of traffic assignment models (TAM), using optimization mathematical programs with travel time functions dependent on both flow and physical queues on arcs. Queue length information is useful for calibrating traffic assignments, and queue lengths at peak hour can impact traffic progression, then queue length of congested routes is discussed in this paper. Information on flow and queues provides performance indicators of the road system.

In section 2, a procedure for sampling the queues length on arterial arcs is presented. This information is useful for the estimation of travel patterns, by means Time Dependent Traffic Assignment Models (TDTAM). The queue length information can also be obtained by means of an Adaptive Traffic Control Systems (ATCS). In section 3, the main approaches of TDTAM are introduced, and the mathematical structure of TDTAM is briefly described. In section 4, an analysis of the mathematical properties of the travel time function on arcs, when flow and queue length grow, is presented, which determines the mathematical characteristics of the TDTAM. Finally, a solution of the TDTAM is explained.

2. ESTIMATION OF QUEUES BY MEANS OF TRAVEL-TIME STUDIES

In an urban network of a large city, the best paths are usually congested and have high delays and queues, then the network requires to be analyzed by means suitable indicators (not just those considered in the equilibrium model). Indicators which guide the route choice in congested networks are required.

Some cities offer real-time traffic information to users, by means Advanced Traveler Information Systems (ATIS), Advanced Passenger Information Systems (APIS) and some App's open systems (such as Google Maps or Waze), from public and private organizations. The availability of real-time information opens a new topic of study, which is focused on the observation, measurement, storage, estimation, reproduction and standardization, of traffic information. The new approaches can be classified as follows:

1. The comprehensive approach uses Big Data (Zhu et al., 2015) and Intelligent Transportation Systems (ITS) to obtain a lot of traffic information (Lu et al., 2015).
2. Some methods of traffic analysis have been developed for measuring traffic indicators through new technologies of communication, global positioning systems (GPS), detection and monitoring, which are integrated in an ITS (Li et al., 2015; Quiroga, 2000; Schroeder et al., 2000).

Hao and Ban (2016) update the state of the art on methods for measuring and calculating queue, and models for estimating the queue length at signalized intersections, by rebuilding vehicle paths from information of detectors located in signalized intersections. They cite recent papers about models based on traffic flow theory, forward-backward waves and queue's formation and propagation, which is appropriate for continuous flow roads but it is limited to discontinuous flow signalized corridors.

A method for estimating the queue length, based on a sampling of the GPS tracks of trips is presented. The trip can include arc sections in a "moving line" state (called "back wheel"), and arc sections where stopped vehicles wait to go through a control or congestion point. It is assumed that the road is known and that in each trip, the vehicle has the same probability of being anywhere in the queue. The presented method is an extension of the algorithm by Londono and Lozano (2014a). The case study presented in this paper, obtains detailed and precise quantitative information about the queue, for two arterial roads of the main network of Mexico City, using a previous traffic assignment (Londono and Lozano, 2012). One of the roads is an arterial road controlled by traffic lights and the other road is a controlled access highway.

The information on travel-time and delays is obtained by using the method of "test vehicle" with GPS (Schroeder et al., 2000). The information is processed to obtain a sample of the queue position in each run. Then, the estimation of the average queue size or the average arc occupancy, the number of waiting cycles and the traveled length at speed slower than 10 km/h, are obtained. The following results are generated:

- A set of tables with the arc occupancy (m) at intersections controlled by traffic lights, at enter-output ramps, and at bottlenecks on controlled access roads.
- A thematic map of the queue arc occupancy.
- The speed profile and queue length diagrams along of each route, and the travel time.

For the case of study, the average queue length at each signalized intersection is shown in Table 1. The queue length indicator (arc occupancy) is represented in the thematic map of Figure 1. The sections in red are the queues (they have a speed lower than 10 km/h and represent "wheel back"). As an example, the time/space diagram for a run on the arterial road controlled by traffic lights, is presented in Figure 2; the "breaks" indicate the presence of delays and queues. The speed profile and the queue position (location) are presented in Figure 3. All the results correspond to a working day during the morning rush hour.

3. TIME DEPENDENT TRAFFIC ASSIGNMENT PROBLEMS

User equilibrium traffic assignment models have been widely used to predict traffic flow in congested networks. This research is focused on the traffic assignment problem that includes the queue as a variable related to travel time, and searches to understand how it influences the travel pattern in an urban network, for both static and dynamic problems.

Static traffic assignment models are widely used in strategic planning processes; their computational complexity is reasonable in comparison with dynamic traffic assignment models. Static traffic assignment problems that consider flow variability versus time on the road network have been studied since the 70s. Solution methods have been proposed for the dynamic problem, trying to get realism (Bliemer et al., 2014). These methods provide an estimation of: flow on arcs, travel time between origin-destination pairs, travel time on arcs, location of congested sections, time or cost on the paths and arcs, etc.

Table 1. Average queue length indicator for sections of both, the arterial road controlled by traffic lights and the controlled access highway (*italics font*), 2013

| Point on the signalized arterial road | Id arc | Queue length (m) | Point on the highway | Idarc | Queue length (m) |
|--|---------------|-------------------------|--|--------------|-------------------------|
| Revolución | | | Altavista | 45 | 35 |
| Andrea de Castagno | 29 | 0 | Madero | 78 | 0 |
| Rembrandt | 57 | 0 | Dr Gálvez | 46 | 42 |
| Antonio Van Dick | 31 | 170 | Rey Cuauhtémoc | 68 | 170 |
| Mixcoac (2 sem) | 58 y 60 | 307 | Altamirano | 48 | 227 |
| Molinos | 59 | 349 | Eje 10 Sur | 49 | 0 |
| Castañeda | 62 | 41 | Río Magdalena crossing Iglesia | 50 | 49 |
| Merced Gómez | 61 | 0 | R. Magdalena crossing Fraternidad | 69 | 69 |
| Barranca del Muerto | 40 | 85 | S Jerónimo | 70 | 87 |
| Macedonio Alcalá | 41 | 0 | G. San Jerónimo | 71 | 0 |
| Corregidora | 63 | 0 | 2° P.P (Periferico crossing San Antonio) | 1 | 0 |
| Sofía | 42 | 42 | | 74 | 0 |
| R. Boker | 64 | 178 | | 73 | 0 |
| Tlacopac | 65 | 75 | | 75 | 0 |
| Maria Luisa | 66 | 0 | | 76 | 0 |
| D. de los Leones | 67 | 108 | Exit ramp (Periférico crossing San Jerónimo) | 77 | 14 |

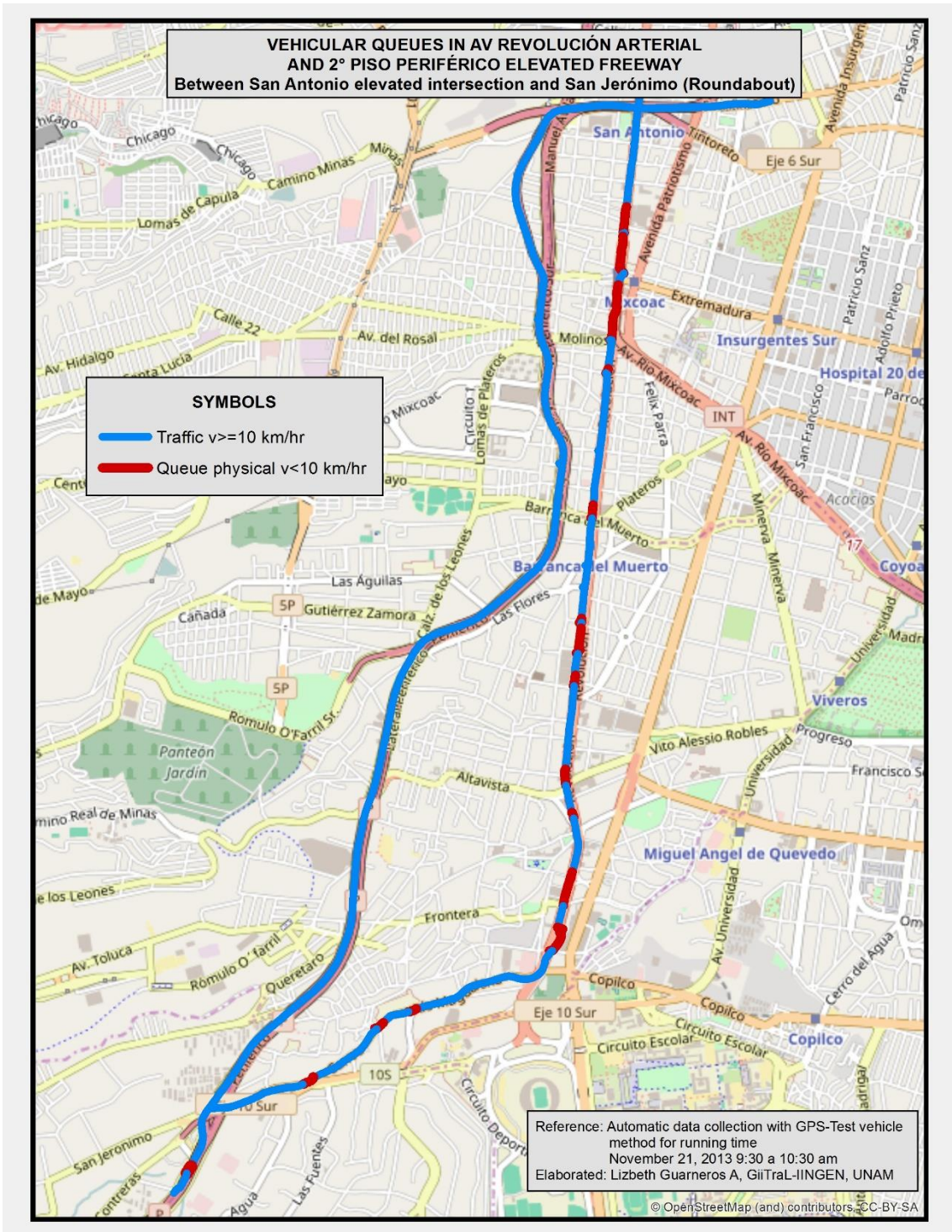


Figure 1. Queue length on the arterial road controlled by traffic lights and the controlled access highway; the red sections indicate the queues

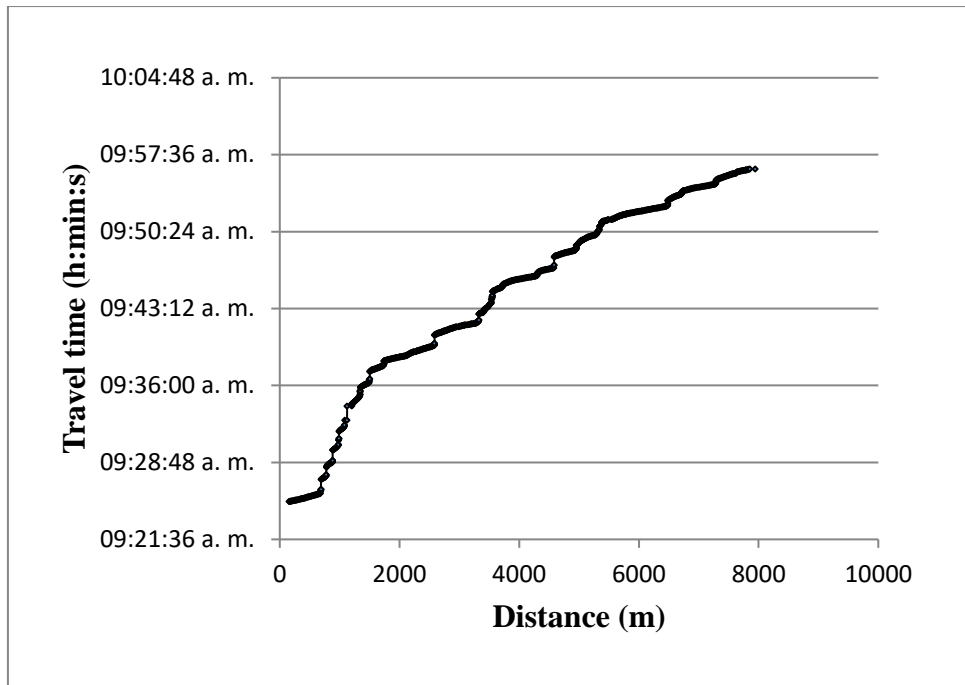


Figure 2. Time/space diagram for a run on the arterial road controlled by traffic lights

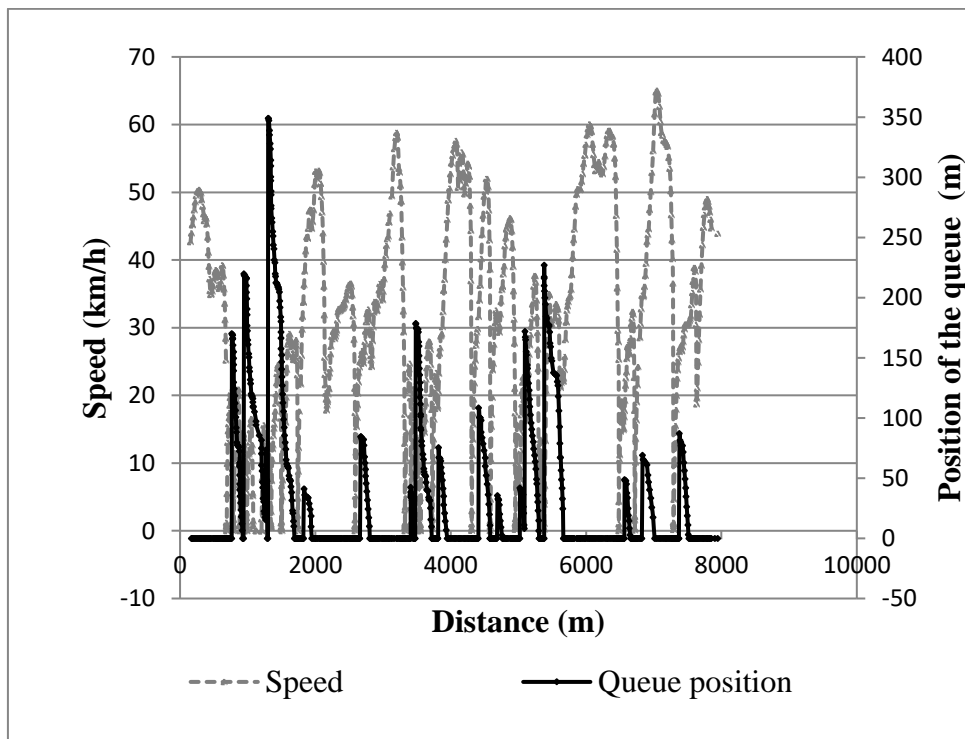


Figure 3. Speed-Distance diagram which shows the speed profile and queue position (location), on the arterial road controlled by traffic lights

The methods to estimate flow patterns in a road network, for a period (either daily, per hour or per fraction of an hour), and predict the flow progression, vary according to the level of detail of the information; they can have macro, meso or microscopic resolution. The dynamic traffic problems can be classified as dynamic traffic user equilibrium assignment, quasi-

dynamic and time dependent. The state of the art about these problems is presented by Long et al., (2016) and Nakayama and Connors (2013).

The traffic assignment problem on networks with ATIS information, is studied by Bifulco et al., (2016); their analysis is framed within the unified theory of equilibrium and day-to-day deterministic dynamic processes.

4. TIME-QUEUE-FLOW DEPENDENT TRAFFIC ASSIGNMENT PROBLEM

In this paper, it is assumed that a user who wants to travel from an origin to a destination can be dissuaded of choosing their original “best” path, if she/he knows the arc’s occupancy, i.e. she/he has real-time information on the queue length.

The travel pattern in TDTAM implies a non-cooperative game between: an upper entity (traffic authority), who estimates the travel pattern which results when travelers anticipate the route choice and such authority imposes actions or rules on the network; and second, a lower level entity (travelers) which based on those actions, choose the best travel strategy with some optimality criterion.

TDTAM is formulated as a bilevel optimization problem (BOP) whose objective function is to minimize the travel time on the network, assigning an origin-destination matrix on the network by means a user equilibrium criterion (user equilibrium traffic assignment model, UETAM).

UETAM depends simultaneously on flow and queue length on each arc; i.e. the arc travel time function depends on the flow and the queue length (Londono and Lozano, 2014 a, b). The following variables for each period of study, are estimated: i) flow on the arcs of the routes used by travelers, ii) flow propagation and iii) travel time on the network, with a mesoscopic resolution.

Although TDTAM is not a network design problem, its analytical strategy does resembles to that problem. The upper level problem considers that each new travel pattern depends on the queue size or arc occupancy, restricted by a UETAM on the lower level problem.

The bilevel optimization network design models for time-dependent deterministic networks, are scarce. Ngoduy et al., (2016) develop a dynamic optimal system traffic assignment model, which estimates arc’s queue and minimizes effects of densifying waves (queue spillback). Wisman et al., (2014) present a discrete network design problem, with a multi-objective optimization approach to include externalities in dynamic traffic management. State of the art on network design problems has been presented by Farahani et al., (2013), Chen (2013), Chiou (2015), among others.

For some urban networks, real travel time and queue information on congestion periods are

available, and can be used for improving the traffic estimation. Also, this information is required by the Akcelik's analysis of the flow-queue-overflow time-dependent travel time function (Akcelik, 2003). The shape of the travel time function on controlled access and signalized roads shows a monotone not decreasing behavior (when flow and queue increase) and it is mathematically well behaved for a BOP solution. However, the time dependent flow pattern model and the flow progression, require careful mathematical analysis. Then TDTAM is formulated as a BOP (TDTAM-BOP) where upper and lower problems are defined with base on Akcelik's function.

TDTAM-BOP is mathematically well behaved and can be transformed into a quadratic mathematical program, based on a critical cone decomposition analysis on the User Equilibrium Assignment (UEA) problem (which has been demonstrated by Patriksson and Rockefellar, 2003). The problem is also directionally differentiable (Patriksson, 2004).

Patriksson and Rockefellar (2003) present a new descent sensitivity algorithm to solve the network design problem expressed as a BOP, with a UEA in the lower level. Chiou (2007) develops several descent algorithms for solving bilevel network design problems. A heuristic search for solving TDTAM-BOP, with a combined gradient sensitivity algorithm (according to its mathematical properties), is identified by Bell and Iida, (1997).

Then, it is proposed to solve TDTAM-BOP by means of the solution of a bilevel programming network design problem, a network flow loading problem, a network flow propagation problem and a user equilibrium traffic assignment problem, in a time-dependent stage.

5. CONCLUSION

It is necessary to improve the analysis of congested roads networks, by means of indicators which provide additional information to those obtained from traffic assignment problems.

Here, a sampling procedure for obtaining average queues on the arcs and the information representation by means maps, graphs and tables, are presented. This information is useful for planning, operation and monitoring processes. It also provides input information for solving BOP, to obtain travel patterns with deterrent information due to queues.

Modeling traffic flow patterns on congested networks is a resource of proactive and reactive planning for the management of traffic on a network. This problem can be formulated as a BOP, given the dependence of the variables on the functions of the upper and lower level problems, and the route choice dependence on the queue and the travel patterns of UEA. TDTAM -BOP requires a flow- overflow time-queue dependent travel time function, which is the key to define its mathematical properties and the search for a solution.

Thus, the Akcelik's time-flow-overflow-queue dependent travel time function is studied, which is mathematically well behaved and it is realistic. Having defined the mathematical structure of TDTAM, the solution procedure and its subproblems were explained. Finally, the process for solving the strategic network design problem is identified, which will be addressed in future work.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank Lizbeth Guarneros who processed the GPS information of each route and made the map.

Gloria Londoño thank the Universidad Autónoma de la Ciudad de México, which supported the research of Gloria Londono in the Instituto de Ingeniería of the UNAM.

REFERENCES

- AKÇELIK, R. AKÇELIK AND ASSOCIATES PTY LTD. (2003). *Speed-flow and bunching relationships for uninterrupted flows*. 25th Conference of Australian Institutes of Transportation Research, University of South Australia, Adelaide, Australia, 3-5 December 2003.
- BELL, M. G. H. AND IIDA, Y. (1997). *Transportation Network Analysis*. JOHN WILEY & SONS. Chichester, England.
- BIFULCO, G. N., CANTARELLA, G. E., SIMONELLI, F. AND VELONA, P. (2016). *Advanced traveller information systems under recurrent traffic conditions: Network equilibrium and stability*. Transportation Research Part B 000, pp. 1-15.
- BLIEMER, MCJ, RAADSEN, MPH, SMITS, E, ZHOU, B AND BELL, MGH (2014). *Quasi-dynamic traffic assignment with residual point queues incorporating a first order node model*. Transportation Research B, 68, pp. 363-384.
- BURT, M., CUDDY, M., RAZO, M. (2014). *Big Data's Implications for Transportation Operations: An Exploration*. U.S. Department of Transportation John A. Volpe National Transportation Systems Center. Report No. FHWA-JPO-14-157.
- CHEN, Q. AND CHEN, H. (2013). *Solution algorithm for a new bi-level discrete network design problem*. Promet-Traffic&Transportation 25, No. 6, pp. 513-524.
- CHIOU, S. W. (2015). *A bi-level decision support system for uncertain network design with equilibrium flow*. Decision Support Systems 69, pp. 50-58.
- CHIOU, S. W. (2007). *A descent framework for arced signal system with network flows*. Applied Mathematics and Computation 194, pp. 441-452.
- FARAHANI, R. Z., MIANDOABCHI, E., SZETO, W. Y. AND RASHIDI, H. (2013). *A review of urban transportation network design problems*. European Journal of Operational Research 229, pp. 281-302.
- HAO, P. AND BAN, X. (2016). *Long queue estimation for signalized intersections using mobile data*. Transportation Research par B 82, pp. 54-73.
- HURST, W. AND DOBBINS, C. (2015). *Guest editorial special issue on: Big data analytics*

- in intelligent systems*. Journal of Computer Sciences and Applications 3, No. 3A, pp. 1-9.
- LI, R., BRADLEY, B., JONES, J. AND MOLONEY, S. (2015). *Quality investigation and variability analysis of GPS travel time data in Sydney*. Australasian Transport Research Forum 2015 Proceedings. 30 September-2 October 2015, Sydney, Australia.
- LONDOÑO, G. AND LOZANO, A. (2012). *Suitable cost functions for signalized arterials and freeways, in the user equilibrium assignment problem*. Procedia - Social and Behavioral Sciences 54, pp. 1176 - 1185.
- LONDOÑO, G. AND LOZANO, A. (2014a). *Dissuasive queues in the time dependent traffic assignment problem*. Procedia - Social and Behavioral Sciences 162, pp. 378-387.
- LONDOÑO, G. AND LOZANO, A. (2014b). *A bilevel optimization program with equilibrium constraints for an urban network dependent on time*. Transportation Research Procedia 3, pp. 905-914
- LONG, J., SZETO, W. Y., GAO, Z., HUANG, H. J. AND SHI, Q. (2016). *The nonlinear equation system approach to solving dynamic user optimal simultaneous route and departure time choice problems*. Transportation Research Part B 83, pp. 179-206.
- LU, H., SUN, Z. AND QU, W. (2015). *Big Data-Driven Based Real-Time Traffic Flow State Identification and Prediction*. Discrete Dynamics in Nature and Society, Hindawi Publishing Corporation, article ID 284906, 11 pages.
- NAKAYAMA, S. AND CONNORS, R. (2013). *A quasi-dynamic assignment model that guarantees unique network equilibrium*. Transportmetrica A: Transport Science, pp. 1-24.
- NGODUY, D., HOANG, N. H. AND WATLING, H. L. (2016). *Optimal queue placement in dynamic system optimum solutions for single origin-destination traffic networks*. Transportation Research Part B 000, pp. 1-22.
- PATRIKSSON, M. (2004). *Sensitivity Analysis of Traffic Equilibria*. Transportation Science INFORMS 38 (3), pp. 258-281.
- PATRIKSSON, M. AND ROCKAFELLAR, R. T. (2003). *Sensitivity analysis of aggregated variational inequality problems, with application to traffic equilibria*. Transportation Science INFORMS 37 (1), pp. 56-68.
- QUIROGA, C. (2000). *Performance measures and data requirements for congestion management systems*. Transportation Research Part C 8, pp. 287-306.
- SCHROEDER, B. J., CUNNINGHAM, C. M., FINDLEY, D. J., HUMMER, J. E. AND TAYLOR, M. A. P., WOOLLEY, J. E. AND ZITO, R. (2000). *Integration of the global positioning system and geographical information systems for traffic congestion studies*. Transportation Research Part C 8, pp. 257-285
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD OF THE NATIONAL ACADEMIES. (2010). Highway Capacity Manual. USA
- WISMANS, L., VAN BERKUM, E., BLIEMER, M. (2014). *Handling multiple objectives in optimization of externalities as objectives for dynamic traffic management*. EJTIR 14 (2), pp. 159-177.
- ZHU, T., XIAO, S., ZHANG, Q., GU, Y., YI, P. AND LI, Y. (2015). *Emergent Technologies in Big Data Sensing: A Survey*. International Journal of Distributed Sensor Networks, Hindawi Publishing Corporation, article ID 902982, 13 pages.

13 Assessing strategies for reducing transportation services within an urban transit network

Francisco A. Ortega Riejos
Juan A. Mesa López Colmenar
University of Seville, Spain

Miguel A. Pozo Montaño
University of Cádiz, Spain

Justo Puerto Albandoz
University of Seville, Spain

ABSTRACT

Railway systems in metropolitan areas carry a high density of daily traffic exposed to the negative consequences derived from disruptions in the service. An interesting topic in the literature is to obtain performance protocols in the presence of contingencies which can affect the system's operation, avoiding the propagation of perturbation and minimizing its consequences.

Assume that, with a small margin of time (e.g., one day), the decision maker of the transportation network knows that a part of the fleet will become inoperative temporarily along a transit line and none additional vehicle will be able to replace the affected mobile units. The decision will require to rescheduling the services by necessarily reducing the number of expeditions (line runs). This will affect travelers who regularly use the transit system to get around.

Consider that the decision maker aims to try to lose the least number of passengers due to the introduced changes into the transit line. A strategy that could be applied is to remove those line runs which are historically less used by travelers without affecting the remaining schedules. Another alternative strategy might be to rescheduling timetables of the available units, taking into account the pattern of arrivals of users to the boarding stations and the user behavior during waiting times (announced in situ).

The aim of this work consists of assessing the decision of rescheduling the train service, reducing the current supply along one transportation line in order to reinforce the service of another line, exploited by the same public operator, which has suffered an incidence or emergency.

Keywords: Railways, disruptions, timetable rescheduling.

1. INTRODUCTION

Planning of public transport systems includes decisions about the design of lines and frequency of service that seek a balance between supply and demand in a given context and with a medium-long time horizon. The occasional failures in the operation of the system are usually not considered in this initial planning stage; therefore, a system, even properly designed, may be unavailable for unforeseen occurrences (such as accidents), or expected episodes of peak demand as a consequence of mass events.

In order to reduce the disruptive effect of these imbalances, the operator of a passenger transport system must be able to implement some control strategy to adjust schedules to traffic conditions in real time. The most commonly used strategies for this purpose are express service (jumping stations with little flow of passengers), travel service without return or deadheading, short courses or short-turn (O'Dell and Wilson, 1999) and the combination of different control actions (Eberlein et al., 1999; Jara-Díaz et al., 2008; Mesa et al., 2009). These decisions fall within the scope of an operator who manages a specific line of transport.

On the other hand, if the incident happens in another transit line maintained by the same operator, this one may choose to reallocate its fleet of vehicles, in order to help for recovering the operability of the affected line with an additional reinforcement of rolling stock coming from other lines which were normally functioning (Wilson et al., 1992; Soeldner, 1993). A first review of models for the rescheduling of railway traffic timetables can be found in Cordeau et al. (1998) and other more recent contribution, oriented to manage incidents, in Törnquist (2007).

Customers plan their trips based on a known schedule, and they can be greatly inconvenienced if the train does not arrive or depart at the expected time. In such cases, travelers can choose different modes of transportation than the usual ones. We propose in this paper a methodology for implementing a redistribution of services along a line, which must be carried out by the operator by determining new schedules for trains within a series of feasible space-time windows, which have previously been set by the manager of rail infrastructure. The objective consists of minimizing the loss of users, who can notice a change in the quality of service that until now they had been receiving.

In Section 2 a model of graphical representation for train schedules is introduced. The formulation of the decision model, in addition to its corresponding resolution algorithm, is presented in Section 3. A computational experience based on an application to a real case is implemented in Section 4. Finally, some conclusions are summarized in Section 5.

2. A GEOMETRIC APPROACH TO MODEL TRAIN SCHEDULES

Railway planners usually use running maps as graphic tools to help them in the planning process. A running map is a time-space diagram where possible crossings of trains can be observed. According to the approach developed in Mesa et al., (2013), a set of diagrams of train operation, associated to the stations along the transit line, can be built following a common pattern of uniform mesh of time squares of length h . By using this geometric resource, activity of trains at each section k can be represented in a comprehensive way. Inside the activity map of the k -th stretch/station, each point will indicate the arriving time (X-coordinate) and the leaving time (Y-coordinate) of a train.

In a generic k -station, each train has assigned a unique point (timetable-point, in the following) whose coordinates must be necessarily located in the upper triangle of the first quadrant above the straight line $Y = X + h$ (the upper sub-diagonal outlined in green).

For instance, Figure 1 shows data corresponding to three different trains. The first one spends a time equivalent to $2h$ in boarding and alighting passengers. Train 2 uses the minimum time required for that operation, h . Finally, train 3 does not stop at station k , hence its position is located on the displaced diagonal in the first quadrant.

The sequence of stations (where a train may stop or not) along the railway line can be identified as a succession of temporary arrival-departure diagrams. As shown in Figure 2, each timetable-point in the k -th map will have its continuation in any of the feasible points at the vertical segment of its projection on the diagonal in the $(k+1)$ -th temporary map.

These previous considerations lead to a directed graph structure that connects a set of feasible points belonging to arrival-departure diagrams that correspond to adjacent stations (see Figure 3).

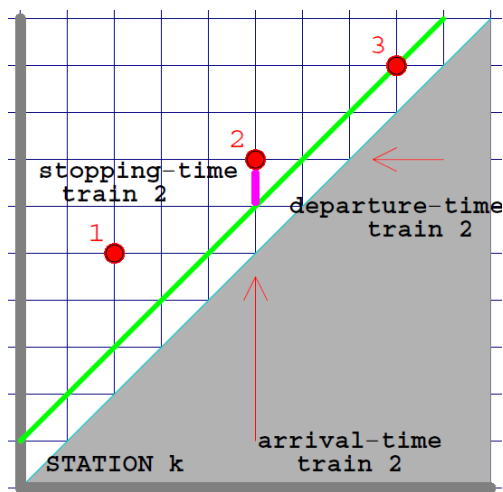


Figure 1. Three trains passing through station k

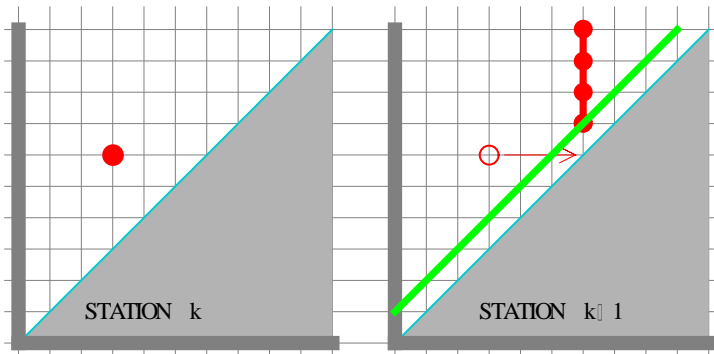


Figure 2. Feasibility zone of timetable-points between consecutive stations

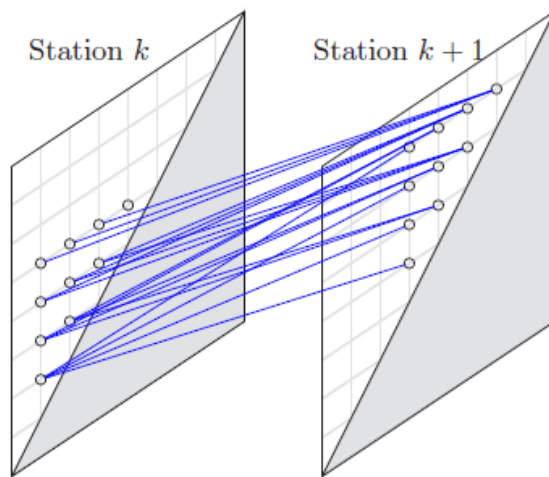


Figure 3. Arcs connecting feasible points corresponding to adjacent stations

Logically, the number of feasible timetable-points will be bounded by the number of tracks available into the considered section. Moreover, each timetable-point in the k -th map will have its continuation in any of the feasible points at the vertical segment of its projection on the diagonal in the $(k + 1)$ -th temporary map.

3. MODEL FORMULATION

These considerations are included in the following formulation.

Indices and sets.

$j \in J$ index identifying trains of set J

$k \in K$ index identifying stations of set K

$u, v \in T$ indexes identifying the time horizon discretization T

$(u, v) \in M_k$ coordinates in a feasible temporary map $M_k \subset T$ at station k

Parameters.

A_v^{jk} population available to boarding train j at station k and at time v

Variables.

x_{uv}^{jk} binary variable equals to 1 if train j is located at point (u,v) at station k ;
0, otherwise

Objective and constraints.

$$z \equiv \text{Max} \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in M_k} A_v^{jk} \cdot x_{uv}^{jk} \quad (1)$$

Subject to:

$$\sum_{j \in J} \sum_{(u,v) \in M_k} x_{uv}^{jk} = |J| \quad k \in K \quad (1a)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(u,v) \in M_k} x_{uv}^{jk} \leq |K| \quad j \in J \quad (1b)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{\substack{u' < v \\ v' > u \\ (u',v) \in M_k}} x_{u'v'}^{jk} \leq 1 \quad (u,v) \in M_k; k \in K \quad (1c)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{\substack{u' < v \\ v' > u \\ (u',v) \in M_k}} x_{u'v'}^{jk} \leq n_k - x_{uv}^{jk} \quad (u,v) \in M_k; k \in K \quad (1d)$$

$$x_{uv}^{jk} \leq \sum_{v' > v} x_{v+1,v'}^{j,k+1} \quad (u,v) \in M_k; j \in J; k \in K - \{|K|\} \quad (1e)$$

$$x_{uv}^{jk} \in \{0,1\} \quad (u,v) \in T; j \in J; k \in K \quad (1f)$$

The objective function (Equation 1) maximizes the number of users who can be transported along the rail corridor, picking them up at their respective stations k during the time interval that they are waiting on platforms, represented by set M_k . Constraints (Equation 1a) establish that the number of train schedules to be located must exactly be $|J|$. Restrictions (Equation 1b) force passage through all stations (with or without stop) for all trains to be determined. Constraints (Equation 1c) indicate that there can be no train arriving/departing from the k -th station if there was just another train operating. Restrictions (Equation 1e) establish that if there is an active (equals to 1) timetable-point located at position (u,v) of the temporary map for the k -th station, then there must also be another active timetable point, at the $(k+1)$ -th station on the v -th column. Limitation of the number of trains that can operate, according to the existing number of tracks (n_k), is indicated by means of constraints (Equation 1d). Finally, restrictions (Equation 1f) state the binary nature of the decision variables in the integer linear programming model.

In order to compute the real number of users that remains into the transit system (avoiding duplicities in the counting process), a threshold must be considered. Let $d(k, v)$ be a parameter that indicates the departure time of the last train but one train that, in the initial schedule, departed from station k before time $v + 1$. If such a train would not exist, then $d(k, v) = 1$. Hence, once established an initial schedule, a value for $d(k, v)$ (greater than 1) can be easily computed, providing a security distance that avoids counting one passenger more than once.

Therefore, in order to maximize the real number of travelers kept in the system after the rescheduling, constraints (Equation 1c) can be modified as follows (Equation 1c’):

$$\sum_{j \in J} \sum_{\substack{u < v \\ v' > \max\{u, d(k, v)\} \\ (u, v') \in M_k}} x_{u'v'}^{jk} \leq 1 \quad (u, v) \in M_k; k \in K \quad (1c')$$

Additionally, an algorithm is implemented for obtaining good solutions (not necessarily optimal) within a competitive computational time. This heuristic approach can be described as follows.

Algorithm

[STEP 1] Generate the sequence of temporary maps corresponding to the sections of railway line. Set the mesh density of parameter h . Locate the existing timetable-points (u, v) weighted by populations A_v^{jk} .

[STEP 2] Calibrate parameter of a logit function and estimate populations associated to the remaining unmeasured timetable-points.

[STEP 3] Determine initial sets:

- Points of map M_{k-1} connected to point (u, v) of map $M_k : E_{(u,v)}^{k-}$
- Points of map M_{k+1} connected to point (u, v) of map $M_k : E_{(u,v)}^{k+}$

[STEP 4] An initial feasible graph G_0 is determined by arc sets $E_{(u,v)}^{k-}$ and $E_{(u,v)}^{k+}$, varying from map $k = 1$ to $k = |K|-1$. Set $j=0$.

[STEP 5] While $j < |J|$

[5.1] Let index e represent the arc that ends at point (u, v) in the k -th map M_k . For each arc e of graph under consideration, the weight A_v^{jk} of its terminal node is assigned. Let A_e denote this weight. Let x_e be a binary variable equal to 1 if arc e is selected; 0, in other case. By using a usual shortest-path algorithm, determine the j -th optimal path connecting two terminal stations.

[5.2] According to those previously selected arcs and constraints Equations 1a, 1b, 1c', 1d, 1e and 1f, redefine arc $E_{(u,v)}^{k-}$ and $E_{(u,v)}^{k+}$, giving rise to the graph G_{j+1} for the next iteration.

[5.3] $j = j + 1$.

The geometrical model above developed can be slightly adapted in order to include the possibility of transfers between different lines within a more complex network (see Mesa et al., 2014).

4. COMPUTATIONAL EXPERIENCE

As illustration, a study case composed of a section of a railway line with seven stations of Line C4 in the commuter train systems of Madrid: Parla [k=1] – Getafe Sector 3 [k=2] – Getafe Centro [k=3] – Las Margaritas Universidad [k=4] – Villaverde Alto [k=5] – Villaverde Bajo [k=6] – Atocha [k=7]. Table 1 shows departure times at stations of six trains that complete the itinerary Parla-Atocha in the time period [6:04,7:00], as well as the number of passengers boarding trains in each station (data provided by the *Spanish* national train operator *Renfe*).

The time horizon [6:04,7:00] has been split into 40 slots of size h (1.5 minutes). Table 2 shows the user's presence at platform waiting a punctual arrival.

As can readily be seen, the current fleet of six trains running according to this schedule, carries 5.598 passengers. Assume that, as consequence of an incident, the system operator must reduce the fleet size by three trains. Note that after the application of a myopic strategy of removing the three expeditions that carry fewer users, the service could only cover to 3.619 passengers, producing a loss of 35.35% of the travelers. Therefore, the subsequent strategy for train rescheduling should minimize the loss of users, by introducing advances or delays in the original schedules of the remainder three vehicles which will remain operative.

Table 1. Departure timetables and passengers boarding in Line C4

| # j | k=1 | | k=2 | | k=3 | | k=4 | | k=5 | |
|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | t | Pas. | T | Pas. | t | Pas. | t | Pas. | t | Pas. |
| 1 | 6:04 | 335 | 6:10 | 1 | 6:13 | 44 | 6:15 | 7 | 6:18 | 44 |
| 2 | 6:12 | 177 | 6:18 | 5 | 6:21 | 113 | 6:24 | 48 | 6:26 | 124 |
| 3 | 6:16 | 307 | 6:22 | 1 | 6:25 | 35 | 6:28 | 29 | 6:30 | 64 |
| 4 | 6:22 | 55 | 6:28 | 8 | 6:31 | 138 | 6:33 | 54 | 6:36 | 163 |
| 5 | 6:28 | 429 | 6:34 | 10 | 6:36 | 145 | 6:39 | 62 | 6:42 | 173 |
| 6 | 6:34 | 511 | 6:40 | 4 | 6:42 | 102 | 6:44 | 26 | 6:46 | 153 |

Table 1 continuation. Departure timetables and passengers boarding in Line C4

| # j | k=6 | | k=7 | |
|-----|------|------|------|------|
| | t | Pas. | t | Pas. |
| 1 | 6:21 | 46 | 6:31 | 147 |
| 2 | 6:29 | 81 | 6:38 | 302 |
| 3 | 6:34 | 58 | 6:42 | 123 |
| 4 | 6:39 | 86 | 6:48 | 234 |
| 5 | 6:44 | 119 | 6:54 | 349 |
| 6 | 6:50 | 115 | 7:00 | 571 |

Table 2. User's presence at platform waiting a punctual arrival of trains

| Timing | 1 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|--------|-----|---|-----|----|-----|----|----|-----|-----|----|----|-----|----|----|-----|
| ST1 | 335 | | 177 | | 307 | | 55 | | 429 | | | 511 | | | |
| ST2 | | 1 | | | | 5 | | 1 | | 8 | | | 10 | | |
| ST3 | | | | 44 | | | | 113 | 35 | | | 138 | | | 145 |
| ST4 | | | | | | | | 7 | | | | 48 | | 29 | |
| ST5 | | | | | | | | | | | 44 | | | | |
| ST6 | | | | | | | | | | | | | | 46 | |
| ST7 | | | | | | | | | | | | | | | |

| Timing | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 28 | 29 | 31 | 32 | 34 | 35 | 37 | 40 |
|--------|-----|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ST1 | | | | | | | | | | | | | | |
| ST2 | 4 | | | | | | | | | | | | | |
| ST3 | | | 102 | | | | | | | | | | | |
| ST4 | | 54 | | | 62 | | 26 | | | | | | | |
| ST5 | 124 | | 64 | | | 163 | | 173 | | 153 | | | | |
| ST6 | | | | 81 | | 58 | | 86 | | 119 | | 115 | | |
| ST7 | | | | 147 | | | | 302 | 123 | | 234 | | 349 | 571 |

The number of passengers who remain faithful as client in the transit system, after a train supply alteration (and a possible travel time increase), can be modeled as:

- A two-level decision model, known as hierarchical logit model (see Daly, 1987), if the user knows the news of the rescheduling when he/she is already in the system.
- A decision model of a single level, if the user previously knows the existence of the rescheduling in advance, and its impact on the increment of travel time (decreasing

the perceived utility), choosing the more convenient alternative mode of transport between the available options.

The situation we assume is the second one. Since departure times of trains at stations were previously known by users, a population of potential travelers is mobilized towards the station platform, converging in time with the timely arrival of such train. Next, since users are unaware of the incident, users will gradually reach the station platforms, hoping to find on time their trains (see Figure 4). Then, they are notified that a service rescheduling has been done and some trains can suffer delays or cancellations. This behavior can produce a decrement in the number of passengers after rescheduling. In Mesa et al., (2013) an estimation of the number of travelers at the station platform is carried out by means of applying Taylor's formula to the logit term for the waiting-time variable. This approach produces a simple coefficient (less than 1) that, after multiplying by initial population, reduces the number of potential travelers waiting at the station platform.

Additionally, the model of demand must describe the interactions between successive waves of user arrivals to the platforms. If a train does not arrive at the scheduled time, a part of the population will leave the station while another portion would remain waiting for the next train, mixing with the next wave of users (see Figure 5). We assume that none user waits beyond two tardy train arrivals.

As example, Figure 6 shows the time slots and the number of passengers boarding the first three trains of the system in the first three stations of Table 1.

Given the gradual access of users to the platforms before the arrival of the train and the decline of this population, after verifying that the expected train will not circulate, we can estimate the number of potential travelers who stay at all time slots in the station platforms. The number of users, ready at platform of station 1 to board a train corresponding to the first three waves, is shown in Figure 7 for successive time slots.

By accumulating the travelers corresponding to independent waves that meet for the same time slot on the platform, we can estimate the efficiency of new train schedules by using the before described algorithm.

Table 3 shows the three most efficient train schedules along the transit line, by assuming that every train must stop at all stations. This context is modeled by imposing equality at constraints (Equation 1b). The total number of passengers, transported by these expeditions which were determined by applying our model, is 5.010, a sensitive improvement with respect to the 3.619 passengers covered by the three most efficient original timetables (myopic strategy). In terms of loss of travelers, this amount only would reach a 10.50%, instead of the earlier 35.35%.

Following on, Table 4 shows the three most efficient line runs by assuming that not all the stations had to be visited. When a train does not stop at a station, it is possible to reduce the running time and to visit the following station at precedent time slot by capturing a possible higher number of passengers. This strategy can be modeled by imposing inequality at constraints (Equation 1b) in our model. Since station 2 (with a very low demand) is not visited by the second train (green sequence), it is possible a later departure for its transit timetable by picking up most passengers at station 1. The number of travelers is now 5.085, and the passenger loss with respect to the setting in absence of incidence is 9.16%.

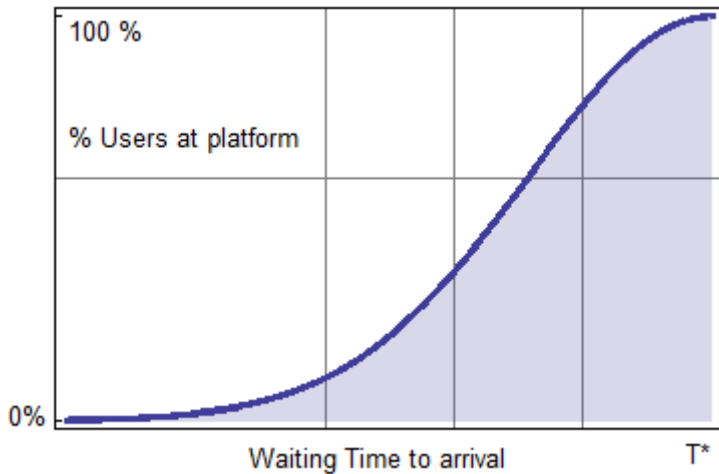


Figure 4. Percentage of users that reach the station platform

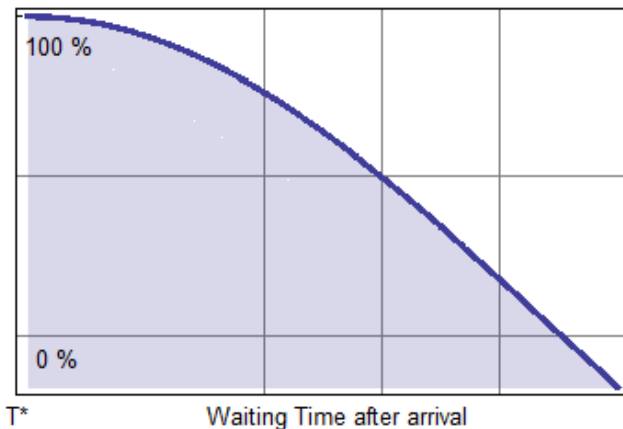


Figure 5. Percentage of users waiting at platform after expected arrival at T*

| Timing | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|--------|-----|---|---|---|---|-----|----|-----|---|----|----|-----|----|----|-----|----|
| ST1 | 335 | | | | | 177 | | 307 | | | 55 | | | | 429 | |
| ST2 | | | | | 1 | | | | | 5 | | 1 | | | | 8 |
| ST3 | | | | | | | 44 | | | | | 113 | | 35 | | |
| ... | | | | | | | | | | | | | | | | |

Figure 6. Number of passengers boarding trains along the transit lines

| | | | | | | | | | | | | | |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| ST1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Wave 1 | 335 | 314 | 295 | 277 | 260 | 244 | | | | | | | |
| Wave 2 | | 109 | 123 | 139 | 157 | 177 | 166 | 156 | | | | | |
| Wave 3 | | | | | | | 273 | 307 | 288 | 270 | 253 | 113 | |
| ... | | | | | | | | | | | | ... | |

Figure 7. Number of travelers ready to board the train in separate waves

Table 3. Three most efficient train schedules along the transit line (with mandatory stops in all stations)

| | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|---|-----|---|---|---|---|----|-----|----|----|----|----|-----|----|----|-----|
| Timing | 1 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| ST1 | | 417 | | | | | | 308 | | | | | 866 | | | |
| ST2 | | | | | | 4 | | | | | 8 | | | | | |
| ST3 | | | | | | | | 132 | | | | | 166 | | | |
| ST4 | | | | | | | | | | | | 45 | | | | |
| ST5 | | | | | | | | | | | | | | | | 142 |
| ST6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ST7 | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|--------|----|----|-----|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| Timing | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 28 | 29 | 31 | 32 | 34 | 35 | 37 | 40 |
| ST1 | | | | | | | | | | | | | | |
| ST2 | 11 | | | | | | | | | | | | | |
| ST3 | | | 221 | | | | | | | | | | | |
| ST4 | | 77 | | | | | 76 | | | | | | | |
| ST5 | | | | | | 215 | | | | 295 | | | | |
| ST6 | | | 106 | | | | | 132 | | | | 212 | | |
| ST7 | | | | | | | | 382 | | | 335 | | | 860 |

Table 4. Three most efficient train schedules along the transit line (without mandatory stops in all stations)

| Timing | 1 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
|--------|---|-----|---|---|---|---|----|-----|-----|----|----|----|-----|----|----|-----|
| ST1 | | 417 | | | | | | 308 | 391 | | | | 866 | | | |
| ST2 | | | | | | 4 | | | | | 8 | | | | | |
| ST3 | | | | | | | | 132 | | | | | 166 | | | |
| ST4 | | | | | | | | | | | | 45 | | | | |
| ST5 | | | | | | | | | | | | | | | | 142 |
| ST6 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ST7 | | | | | | | | | | | | | | | | |

| Timing | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 28 | 29 | 31 | 32 | 34 | 35 | 37 | 40 |
|--------|----|----|-----|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| ST1 | | | | | | | | | | | | | | |
| ST2 | 11 | | | | | | | | | | | | | |
| ST3 | | | 221 | | | | | | | | | | | |
| ST4 | | 77 | | | | | 76 | | | | | | | |
| ST5 | | | | | | 215 | | | | 295 | | | | |
| ST6 | | | 106 | | | | | 132 | | | | 212 | | |
| ST7 | | | | | | | | 382 | | | 335 | | | 860 |

5. CONCLUSIONS

We have presented a new approach for implementing a redistribution of service along a railway line, which must be carried out by the operator by determining new schedules for trains. Planar grids represent the basis of a geometric model for identifying possible locations for train timetables. An optimization model has been formulated in order to decide an effective rescheduling motivated by a forced reduction in the existing fleet size. This model determines in two possible scenarios (with/without mandatory stops in all stations) the more efficient solutions that can help to make operative decisions in a railway transportation system.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research work was supported by the Minister of Economy and Competitiveness of Spain and the European Funds for Regional Development under grants MTM2015-67706-P (MINECO/FEDER, UE) and MTM2013-46962-C2-1-P, by the Excellence program of the

Andalusian Government, under grant FQM-5849, and finally by the FEDER funds of the European Union.

REFERENCES

- CORDEAU, J.-F., TOTH, P. and VIGO, D. (1998). *A survey of optimization models for train routing and scheduling*. *Transportation Science* 32(4), pp. 380–404.
- DALY, A. (1987). *Estimating logit models*. *Transportation Research Part B: Methodological* 21(4), pp. 251 – 267.
- EBERLEIN, X.-J., WILSON, N. and BERNSTEIN, D. (1999). *Modeling real-time control strategies in public transit operations*. In N. Wilson, ed., *Computer-Aided Transit Scheduling*, vol. 471, pp. 325–346. Springer-Verlag.
- JARA-DIAZ, S., TIRACHINI, A. and CORTES, C. E. (2008). *Modeling public transport corridors with aggregate and disaggregate demand*. *Journal of Transport Geography* 16(6), pp. 430 – 435. *Growing Public Transport Patronage*.
- MESA, J. A., ORTEGA, F. A. and POZO, M. A. (2009). *Effective allocation of fleet frequencies by reducing intermediate stops and short turning in transit systems*. *Lecture Notes in Computer Science* 5868(8), pp. 293 – 309.
- MESA, J. A., ORTEGA, F. A., and POZO, M. A. (2013). *A Geometric Model for an Effective Rescheduling after Reducing Service in Public Transportation Systems*. *Computers & Operations Research* 40 (3), 737-746.
- MESA, J. A., ORTEGA, F. A., POZO, M. A. and PUERTO, J. (2014). *Rescheduling Railway Timetables in Presence of Passenger Transfers Between Lines Within a Transportation Network*. *Advances in Intelligent Systems and Computing* vol. 262. *Computer-based Modelling and Optimization in Transportation*. J. F. de Sousa and R. Rossi (eds.). Springer International Publishing Switzerland (doi 10.1007/978-3-319-04630-3_26).
- O'DELL, S. and WILSON, N. (1999). *Optimal real-time control strategies for rail transit operations during disruptions*. In N. Wilson, ed., *Computer-Aided Transit Scheduling*, vol. 471, pp. 299–323. Springer-Verlag.
- SOELDNER, D. (1993). *A Comparison of Control Options on the MBTA green line*. Master's thesis, Civil Engineering, MIT.
- TÖRNQUIST, J. (2007). *Railway traffic disturbance management—an experimental analysis of disturbance complexity, management objectives and limitations in planning horizon*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 41(3), pp. 249 – 266.
- WILSON, N. H. M., MACCHI, R.A., FELLOWS, R. E. and DECKO, A. A. (1992). *Improving service on the mbta green line through better operations control*. *Transportation Research Record* 1361, pp. 296–304.

14 Elaboração de linhas alimentadoras para as cidades do Gama e de Santa Maria dentro do Modelo Tronco-Alimentado da Rede de Linhas do BRT Sul de Brasília/DF

Roberto Bernardo da Silva
Evaldo Cesar Cavalcante Rodrigues
José Matsuo Shimoishi
Universidade de Brasília, Brasil

Tiago Luiz Messias
Alessandro Silva Barbosa
Transporte Urbano do Distrito Federal, Brasil

RESUMO

O processo para o planejamento e criação de linhas alimentadoras/distribuidores baseia-se nos problemas recorrentes que existiam nas cidades de Gama e Santa Maria. Analisando a malha viária e as linhas diretas das cidades de Gama e de Santa Maria que vigorava até o início de 2014, perceberam-se algumas características particulares em cada cidade. O objetivo deste artigo é elaborar e dimensionar linhas alimentadoras/distribuidoras para as cidades de Gama e de Santa Maria dentro do modelo tronco-alimentado da rede de linhas do BRT Sul de Brasília/DF. A metodologia de pesquisa está ancorada em pesquisa bibliográfica e documental. Empregou-se brainstorming com representantes da Secretaria de Estado de Mobilidade do Distrito Federal – SEMOB, e da Transporte Urbano do Distrito Federal – DFTRANS, particularmente na gerência de programação e monitoramento (responsável pela criação, ajustamento, extinção de linhas, emissão de ordem de serviço e programação) a fim de obter uma visão de como se operacionaliza o sistema. Os resultados mostraram uma melhora significativa no atendimento nas duas cidades, principalmente nas regiões de atendimento precário, que passou a ser frequente, assim como uma diminuição no tempo de percurso dentro das cidades.

Palavras-chave: Transporte Público Coletivo (TPC), Bus Rapid Transit (BRT), Linhas Alimentadoras, Modelo Tronco-Alimentado.

1. INTRODUÇÃO

O transporte é uma das principais necessidades da sociedade, pois este desempenha papel fundamental, direito de locomover-se, gerador de desenvolvimento humano. Com o crescimento descontrolado das cidades fez a necessidade por mobilidade aumentar. Assim houve a necessidade de criar alternativas sociais, individuais, empresarias e governamentais.

Quanto às ações governamentais, observa-se a criação dos sistemas públicos de transporte.

A EC 90/15 incluiu recentemente o transporte na lista de direitos sociais do cidadão previstos no Artigo 6º da Constituição, ao lado de educação, saúde, alimentação, trabalho, moradia, lazer, segurança, Previdência Social, proteção à maternidade e à infância e assistência aos desamparados. Isso implica que, em médio prazo, essa mudança deve abrir caminho, por exemplo, para proposição de outras leis para destinação de recursos ao setor de transportes, como ocorre em outras áreas.

O sistema de transporte público do Distrito Federal foi um instrumento criado pela lei orgânica do Distrito Federal e é regulado pela lei nº 4.011 de 2007. A Lei diz que: “O Sistema de Transporte do Distrito Federal subordina-se aos princípios de preservação da vida, segurança, conforto das pessoas, defesa do meio ambiente e do patrimônio arquitetônico e paisagístico”.

A lei nº 4.011/2007 descreve que compete ao Distrito Federal (2007), por intermédio da Secretaria de Estado de Transportes, planejar, regulamentar, organizar, delegar, definir políticas tarifárias e controlar todas e quaisquer modalidades ou categorias de serviço relativas ao transporte público coletivo integrante do Sistema de Transporte do Distrito Federal, instituído pela Lei Orgânica, Título VII, Capítulo V, bem como promover a articulação do planejamento dos serviços com as políticas de desenvolvimento urbano do Distrito Federal.

Os serviços que compõem o Sistema de Transporte Público Coletivo (STPC) são classificados em básico e complementar. O primeiro compreende as linhas dos modos rodoviários e metroviários, que poderão operar mediante integração física, tarifária e operacional, visando proporcionar aos cidadãos o acesso universal, seguro e equânime ao espaço urbano. O segundo compreende linhas do modo rodoviário com características diferenciadas que visem atender segmentos específicos de usuários (serviço rural; portadores de necessidades especiais).

As especificações do Sistema e configuração operacional básica do sistema no serviço básico, que foram implantados com a operacionalização do edital nº 1/2011 ST/DF, que foi elaborada a partir da perspectiva de uma grande variedade de padrões de viagens – pares origem-destino – demandam uma grande variedade de linhas de desejo, como demonstra a Figura 1. Por essa razão, faz-se necessário acomodar uma gama de regiões de pequenos volumes de viagens em grupos maiores, equilibrando serviços tronco-alimentados e diretos conforme as necessidades da população, veículos menores em áreas de baixa densidade – permitindo assim maior número de viagens e maior capilaridade do sistema – e corredores de transporte massivo para maiores volumes de passageiros e maiores distâncias percorridas.

Os mapas esquemáticos da Figura 1 apresentam uma comparação da concepção operacional entre os serviços diretos, modelo anterior, e os serviços tronco-alimentadores, especificados no sistema licitado, modelo que agora é executado ou operacionalizado.

O objetivo desta pesquisa é elaborar e dimensionar linhas alimentadoras/distribuidoras para as cidades de Gama e de Santa Maria dentro do modelo tronco-alimentado da rede de linhas do BRT Sul de Brasília/DF. A hipótese de base é que a composição de um sistema integrado de transportes com serviços tronco-alimentados e terminais de integração possibilitará a racionalização da operação do serviço, com melhor aproveitamento da frota e redução de custos operacionais.

Se for confirmada essa hipótese, o enfoque na composição de um sistema integrado de transportes com serviços tronco-alimentados e terminais de integração é de grande utilidade para os sistemas de transporte coletivo por ônibus, uma vez que possibilitará um melhoramento significativo no atendimento nas cidades, principalmente nas regiões onde o atendimento é precário, passando a ser frequente.

2. IMPORTÂNCIA DO TRANSPORTE URBANO

Para Rodrigues (2014), o transporte é um importante agente de estruturação de políticas e das estratégias para viabilizar o espaço urbano na prestação de serviço de deslocamento de pessoas e produtos para a sociedade, principalmente por interferir nos padrões de distribuição da população, estabelecendo o seu papel de ligação entre as atividades produtivas e as residências, com implicações diretas na disposição do uso, ocupação e valor do solo.

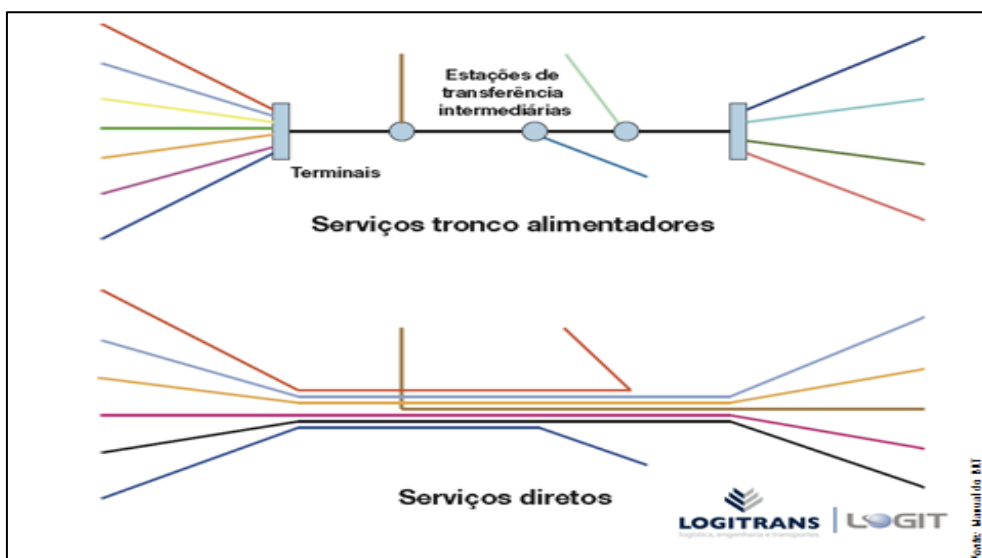


Figura 1. Serviço tronco-alimentado e Serviço direto

Fonte: Manual do BRT, 2008

Segundo Caiafa (2002), os bairros são criados num formato de uma “Progressão Aritmética” e as trajetórias de deslocamento numa “Progressão Geométrica”. Com o crescimento desordenado das cidades, os sistemas de transportes, em geral, não conseguem acompanhar as necessidades crescentes de deslocamento da população de um novo bairro para os diversos outros já existentes. De acordo com Vasconcellos (2005), o planejamento urbano tem como finalidade a definição e adequação dos espaços urbanos e como eles serão usados e ocupados.

O transporte urbano quando cumpre a sua função social e econômica está muito associado ao desenvolvimento de uma região, por principalmente gerar atrativos para o deslocamento e qualidade de vida para a população. Vasconcellos (2005) classifica o transporte em público e privado, com destaque para o serviço de transporte coletivo público, que pode ser ofertado pelas empresas de natureza: pública ou privada. Neste contexto, de acordo com Rodrigues (2014), a população que é servida por empresas de transporte privadas, que geralmente são privadas receptoras de ato normativo do gestor público para operar (concessão, autorização ou permissão) e em outros casos, porém, menos comum no Brasil, o próprio gestor público cria uma empresa pública para oferecer o serviço de transporte.

Caiafa (2002) afirma que, ao contrário do que o brasileiro vislumbra sobre a estrutura econômica neoliberal existente nos Estados Unidos, o transporte urbano tem forte tendência a ser oferecido por empresas públicas, por ser tratado neste formato público, na região e cidade “vitrine” de Nova York, que tem na “Metropolitan Transportation Authority – MTA”, agência pública criada para gestão do transporte coletivo na cidade, que recentemente encampou as últimas linhas de ônibus que ainda eram exploradas pelas empresas privadas.

No entanto, há diferenças com certa predominância na atuação das entidades públicas e privadas na oferta dos serviços de transportes no país. O Estado está mais presente na gestão de transporte no modal ferroviário (metrô e trem urbano), enquanto as empresas privadas estão mais representadas no modal rodoviário (ônibus), a partir do direito de explorar o serviço de processo licitatório de linhas de ônibus.

Segundo Rodrigues (2014), o sistema de ônibus exerce um papel importante no transporte público, por ser mais flexível quando comparado aos trens e metrôs. Entretanto, segundo Ribeiro (2001), no que se refere à confiabilidade, conforto e segurança, que são das principais características buscadas pelos usuários, esses últimos são destacadamente melhores, pois, além disso, transportam uma maior quantidade de passageiros e proporcionam um tempo de viagem inferior.

Nas grandes cidades brasileiras a frota de veículos particulares vem crescendo num ritmo frenético nos últimos anos; esse aumento é devido principalmente ao crescimento demográfico dessas cidades, aumento do poder aquisitivo da população e também às facilidades para financiamento de automóveis.

Em Brasília, no ano de 2014, a frota atingiu um milhão e quatrocentos mil veículos particulares no primeiro semestre, segundo dados publicados pela Secretaria de Transportes do Distrito Federal. Vasconcellos (2005) relata que com as consequências desse aumento da frota têm-se o aumento dos congestionamentos, dos acidentes de trânsito e do nível de poluição (maior emissão de gases poluentes no momento do “engarrafamento” no trânsito), com reflexo significativo na origem de problemas de saúde relacionados às doenças respiratórias e ao estresse.

Ribeiro (2001) elenca as alternativas para redução de congestionamentos, sugeridas por especialistas da área, que envolvem além do uso de transporte coletivo, o transporte solidário – que reduziria significativamente a quantidade de veículos nas ruas, pois a média é de 1,5 pessoa por automóvel; e a bicicleta – já que o Distrito Federal possui terreno plano e um clima com pouca chuva. Apesar de serem sugestões interessantes, algumas barreiras teriam que ser quebradas para um impacto significativo no trânsito da cidade.

Uma delas é a barreira cultural, quando analisado o uso do meio não-motorizado, a bicicleta, em virtude de no país ela não é vista como um meio de transporte, mas sim como um equipamento de lazer. Além disso, Vasconcellos (2005) afirma que, apesar de seu custo de operação e aquisição muito baixo, seria necessário um investimento em infraestrutura viária, sinalizações, ações educativas aos motoristas para garantir maior segurança aos usuários. Ribeiro (2001) relata que o transporte solidário exigiria que todos os passageiros tivessem a mesma rotina de entrada e saída de seus serviços e estariam condicionados àquele trajeto, não podendo alterá-lo para resolver suas questões pessoais a fim de não prejudicar os demais passageiros.

Para Rodrigues (2014), percebe-se então que a alternativa mais viável e mais impactante seria a utilização do transporte coletivo, já que seus benefícios vão da redução de veículos nas ruas até a diminuição (ressalvadas as proporções) da emissão de gases nocivos ao meio ambiente. Esse impacto se torna maior quando da utilização do sistema metroviário, por utilizar energia renovável e não residual.

3. PLANEJAMENTO DE TRANSPORTES

O serviço de transporte necessita de um planejamento que deve abarcar os modos motorizados e não-motorizados de deslocamento de pessoas e produtos, com a priorização dos mais viáveis sistemas de transporte, que avalie cada desempenho e meios adequados para as condições sociais, econômicas e culturais existentes numa determinada região ou microrregião.

De acordo com Kon (1995), na visão macro do ambiente urbano, os sistemas de transporte, a distribuição da população e as atividades produtivas necessitam de harmonia e equilíbrio para garantir eficiência no deslocamento de valores materiais e imateriais, de forma que

qualquer modificação introduzida neste ambiente sistêmico gere impactos variados para a cidade. De acordo com Rodrigues (2014), entende-se por impactos as reações nos sistemas perante a introdução de elementos estranhos na área considerada, que resultem em modificações na estrutura preexistente.

O planejamento de transporte é o grande responsável pela mobilidade urbana e transformações dos padrões de ocupação, operando em conversões nos usos e modificações no adensamento do solo. Vários são outros fatores responsáveis pela estruturação interurbana e sua reordenação; entretanto Smolka (2009) enumera os seguintes aspectos: demográficos, associados às mudanças de fases do ciclo de vidas das famílias e desmembramento familiar; socioeconômicos, relacionados à alteração do valor do imóvel, mudança de local de emprego, melhorias salariais; e ambientais e culturais, ligados a uma eventual inadequação da vizinhança, deterioração do meio ambiente, alterações urbanísticas, segurança e de fatores relativos ao marketing ambiental.

O gestor público procura utilizar os recursos dos modais de transporte como elementos de planejamento estratégico de acessibilidade para as variadas demandas de deslocamentos do meio urbano interno e para áreas externas. Para Boyne e Chen (2006), o planejamento estratégico dos transportes define a infraestrutura de circulação, que vai permitir o deslocamento de pessoas e produtos, e os mais diversos veículos e os serviços ofertados, para viabilizar resultados de fluidez no trânsito dos centros urbanos.

4. METODOLOGIA

A pesquisa foi elaborada durante o segundo semestre de 2015, como um trabalho de finalização da disciplina Operação do Sistema de Transporte Público do Programa de Pós-graduação em Transportes (PPGT) da Universidade de Brasília (UnB). A metodologia ancorou-se na pesquisa bibliográfica e documental. Empregou-se *brainstorming* com representantes da Secretaria de Estado de Mobilidade do Distrito Federal – SEMOB, e da Transporte Urbano do Distrito Federal – DFTRANS, particularmente na gerência de programação e monitoramento (responsável pela criação, ajustamento; extinção de linhas, emissão de ordem de serviço e programação) com a finalidade de adquirir uma visão de como se operacionalizava o sistema.

O processo de criação da rede do Gama e Santa Maria levou-se em consideração a resolução dos seguintes problemas:

- Tempo de percurso elevado. Na cidade do Gama, levava-se cerca de 40 minutos dentro da cidade antes de pegar a via DF-480 rumo à Brasília; e
- Carências de atendimento. As linhas ofereciam baixo ou nenhum atendimento em diversos pontos nas duas cidades.

A partir de então, a elaboração e o dimensionamento das linhas foram divididos em dois momentos:

Primeiro momento:

- Desenhar as linhas alimentadoras;
- Levantamento de linhas atuais por destino (W3, L2, Cruzeiro, Lago, Paranoá, Taguatinga etc);
- Levantamento do carregamento destas;
- Desmembrá-las usando o Terminal de Integração do Gama (Itinerário Gráfico – KML, QGis e JPG);
- Dimensioná-las calculando frota e hadway; e
- Criar Tabela Horária conforme os cálculos.

Segundo momento, dimensionar as linhas criadas:

- Do Gama rumo à Rodoviária do Plano Piloto;
- Do Gama rumo às demais localidades, salvo Santa Maria;
- Do Gama (circulares);
- Do Gama rumo a Santa Maria (circulares);
- De Santa Maria rumo à Rodoviária do Plano Piloto;
- De Santa Maria rumo às demais localidades, salvo o Gama;
- De Santa Maria (circulares); e
- De Santa Maria rumo ao Gama (circulares).

As linhas alimentadoras foram criadas buscando mesclar a primeira metade do percurso com trechos de alta demanda com o restante do itinerário de baixa demanda, onde a maior demanda é o objetivo da linha e o trecho de menor demanda serve para aumentar a velocidade diminuindo seu tempo de percurso.

Para definição do quantitativo da frota, por serviço e tecnologia, foram considerados como premissas dois tipos de serviços na linha troncal: Expresso e Parador, com tecnologias veiculares Ônibus Articulado e Padron, com capacidade de 130 e 90 passageiros respectivamente. Para o Serviço Alimentador/Distribuidor foi considerando veículo com menor capacidade, Convencional e Miniônibus, com 80 e 35 passageiros. Para diminuição do *Headway* das linhas alimentadoras a um patamar aceitável de tempo de espera, foi utilizado uma Taxa de Ocupação máxima de 50% nos veículos convencionais e 80% nos miniônibus.

Para o cálculo da frota foi ainda considerado os dados de demanda na Hora Pico Crítica – HPC coletada do Sistema de Bilhetagem Automática – SBA, Distância do Itinerário (km) e Tempo de Ciclo (min).

Segue a Tabela 1 com definição da frota necessária à operação do BRT Sul na cidade do

Gama, considerando 100% da demanda na HPC em apenas uma linha Expressa sem serviço Parador, com todos os veículos Articulados.

Na Tabela 2 está à configuração da frota com dois serviços: Expresso e Parador utilizando ambos veículos articulados. Foi considerando como premissa que 60% da demanda utilizará a linha Expressa para Rodoviária do Plano Piloto e 40% na linha paradora que operará nos Eixos Rodoviários Auxiliares Sul, enquanto a Linha Expressa operará no Eixo Rodoviário Sul.

Na Tabela 3, foi parametrizada a frota considerando como premissa os dados de demanda de acordo com os dados da Tabela 2. Entretanto, para a linha Paradora foi dividido a demanda em duas tecnologias distintas Ônibus Articulado e Padron, sendo dividido a demanda deste serviço com 60% para os veículos Articulados e 40% para o Padron.

Nas linhas Alimentadoras/Distribuidoras foi considerado uma demanda maior que a efetivamente foi verificado no SBA para as linhas que vão em direção a Rodoviária do Plano Piloto, pois este serviço pode também ser utilizado para atendimento como circulares internas na cidade do Gama. Ademais, se fosse apenas considerando a demanda nas Alimentadoras/Distribuidoras a mesma do serviço Troncal, em função da distribuição desta demanda em 7 linhas o *Headway* seria alto, não sendo possível sincronia entre os dois serviços do BRT Sul e o tornando pouco atrativo.

Na Tabela 4 têm-se os parâmetros do serviço Alimentador/Distribuidor com uma Taxa de Ocupação inferior à capacidade máxima dos veículos e demanda maior que a do serviço Troncal. É de se considerar que a demanda das Alimentadoras/Distribuidoras está apenas considerando como destino final da viagem a Rodoviária do Plano Piloto e os Eixos Rodoviários Auxiliares; quando da incorporação das demandas das W3 Sul e Norte, a Taxa de Ocupação dos veículos aumentará, no entanto, haver grandes alterações nos *Headway* agora propostos.

Na Figura 2 tem-se o desenho do serviço Alimentador/Distribuidor.

É de se ressaltar que os quantitativos constantes nas tabelas acima são o número de veículos para operação inicial, sendo necessária adequação da frota às demandas do BRT Sul, bem como os ajustes necessários após o início da operação comercial, podendo oscilar para mais ou menos, com objetivo de equalizar a prestação do serviço de forma satisfatória sem onerar o sistema.

Detalhando mais o processo e considerando que apenas a infraestrutura do BRT Sul – até a Rodoviária do Plano Piloto está concluída e que o trecho que liga as cidades de Gama e Santa Maria ao Terminal da Asa Sul – TAS, encontra-se em obras, só foi considerado para calibração e alocação da Frota as linhas que tem destino ou passagem pela Rodoviária do Plano Piloto.

A seguir, a formatação de cada linha troncal e alimentadora do sistema e dimensionamento. Apesar dos mapas das linhas Troncais estar como “Circulares”, estas linhas são sentido Ida e Volta. Não está neste expediente as Linhas Paradoras, sem, no entanto, terem sido desconsideradas para calibração do sistema. Todas as tabelas de programação consideram os períodos de pico.

A linha Troncal do BRT Sul com origem em Santa Maria e destino à Rodoviária do Plano Piloto tem duas características de serviço: Expresso e Parador. Para tanto, foram calibrados os serviços considerando a distribuição da demanda em 60% para a Linha Expressa e 40% para a Linha Paradora.

A linha Expressa operará exclusivamente com veículo articulado, nos dias úteis. Já a linha Paradora poderá ter uma operação com as duas tecnologias disponíveis para operação do BRT Sul, veículo articulado e padron.

Quando da parametrização da linha Paradora foi considerado para os Períodos de Pico a utilização das duas tecnologias. Nesta situação o *headway* fica em 12 minutos para cada tecnologia, portanto, de 6 minutos para a linha. Assim, a linha Expressa terá intervalo de viagens no pico 5 minutos na hora mais carregada.

A linha alimentadora de maior demanda de Santa Maria é a que transita pela Avenida Alagados, sendo parametrizada com veículo básico com taxa de ocupação 90% para o período de pico.

A linha alimentadora da Avenida Santa Maria também está parametrizada com veículo básico com taxa de ocupação 90% para o período de pico.

Tabela 1. Frota apenas com uma linha Expressa para toda demanda

| Tipo de Serviço | Km | Vel km/h | Tiempo Ciclo (min) | Tiempo Ida (min) | Tiempo Volta (min) | Demanda | Tecnología | Capacidade | Nº Veículo hora | Headway | Frota |
|-----------------|----|----------|--------------------|------------------|--------------------|---------|------------|------------|-----------------|---------|-------|
| Expresso | 30 | 45 | 80 | 40 | 40 | 1578 | Articulado | 130 | 11 | 6 | 14 |

Tabela 2. Frota com linhas Expressa e Paradora

| Tipo de Serviço | Km | Vel km/h | Tiempo Ciclo (min) | Tiempo Ida (min) | Tiempo Volta (min) | Demanda | Tecnología | Capacidade | Nº Veículo hora | Headway | Frota |
|-----------------|----|----------|--------------------|------------------|--------------------|---------|------------|------------|-----------------|---------|-------|
| Expresso | 30 | 45 | 80 | 40 | 40 | 946 | Articulado | 130 | 8 | 8 | 11 |
| Parador | 30 | 40 | 90 | 45 | 45 | 632 | Articulado | 130 | 5 | 12 | 8 |

Tabela 3. Frota com linhas Expressa e Paradora, com tecnologias distintas na Paradora

| Tipo de Serviço | Km | Vel km/h | Tiempo Ciclo (min) | Tiempo Ida (min) | Tiempo Volta (min) | Demanda | Tecnología | Capacidade | N° Veículo hora | Headway | Frota |
|-----------------|----|----------|--------------------|------------------|--------------------|---------|------------|------------|-----------------|---------|-------|
| Expresso | 30 | 45 | 80 | 40 | 40 | 946 | Articulado | 130 | 8 | 8 | 11 |
| Tipo de Serviço | Km | Vel km/h | Tiempo Ciclo (min) | Tiempo Ida (min) | Tiempo Volta (min) | Demanda | Tecnología | Capacidade | N° Veículo hora | Headway | Frota |
| Parador | 30 | 40 | 90 | 45 | 45 | 379 | Articulado | 130 | 3 | 20 | 5 |
| Parador | 30 | 40 | 90 | 45 | 45 | 253 | Padron | 90 | 3 | 20 | 5 |

Tabela 4. Frota do serviço alimentador/distribuidor

| N° | Setores | Km | Vel. km/h | Tiempo Ciclo (min) | Tiempo Ida (min) | Tiempo Volta (min) | Demanda | Tecnología | Capacidade | N° Veículo hora | Headway | Frota |
|------|------------------------------------|-------|-----------|--------------------|------------------|--------------------|---------|-------------------|------------|-----------------|---------|-------|
| 3101 | Setor Sul Q13 /15 Leste/Sesc | 15,59 | 18 | 52 | 26 | 26 | 280 | Conven- cional | 40 | 7 | 9 | 6 |
| 3102 | Setor Sul Lado Leste Itamaracá | 21,06 | 18 | 70 | 35 | 35 | 240 | Conven- cional | 40 | 6 | 10 | 7 |
| 3103 | Setor Sul Lado Leste Colméia | 25,46 | 18 | 85 | 42 | 42 | 45 | Conven- cional | 40 | 1 | 53 | 2 |
| 3104 | Setor Oeste/Central/ QI Leste | 21,19 | 18 | 71 | 35 | 35 | 440 | Conven- cional | 40 | 11 | 5 | 13 |
| 3105 | Pioneiros/Sul Contorno Oeste | 15,61 | 25 | 37 | 19 | 19 | 110 | Minió niubus | 30 | 4 | 15 | 2 |
| 3106 | Setor Sul Q. Pares/ Contorno Oeste | 17,68 | 20 | 53 | 27 | 27 | 300 | Conven- cional | 40 | 8 | 8 | 7 |
| 3107 | Setor Oeste Interno/Norte | 18,33 | 18 | 61 | 31 | 31 | 400 | Conven- cional | 40 | 10 | 6 | 10 |

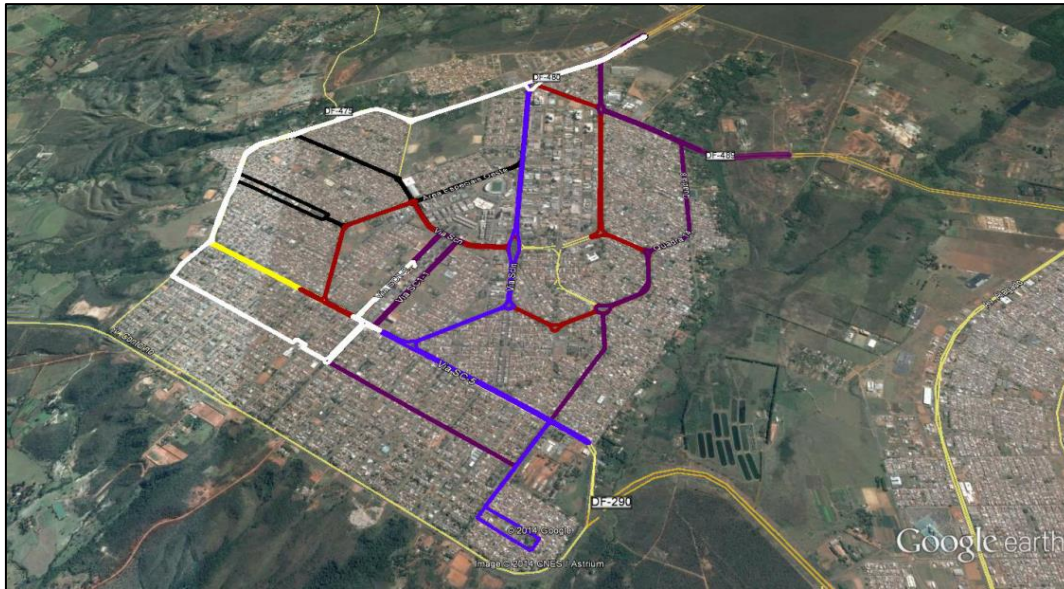


Figura 2. Rede alimentadora/distribuidora



Figura 3. Linha troncal Santa Maria/Rodoviária do Plano Piloto

Tabela 5. Linha troncal terminal de Santa Maria/Rodoviária do Plano Piloto¹ (Expressa)

| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Viagens do veículo por hora | 12 | 19 | 15 | 10 | 13 | 17 | 15 | 9 |
| Intervalo entre viagens (headway) | 5 | 3 | 4 | 6 | 5 | 4 | 4 | 7 |
| Frota necessária | 16 | 26 | 20 | 14 | 18 | 23 | 20 | 12 |
| Demanda Pico | | | | | | | | |
| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| Passageiros | 1554 | 2371 | 1824 | 1293 | 1589 | 2168 | 1833 | 1137 |

1. Considerando toda demanda em apenas uma linha Expressa

Tabela 6. Linha troncal terminal de Santa Maria/Rodoviária do Plano Piloto² (Expressa)

| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Viagens do veículo por hora | 8 | 11 | 9 | 6 | 8 | 11 | 9 | 6 |
| Intervalo entre viagens (headway) | 8 | 5 | 7 | 10 | 8 | 5 | 7 | 10 |
| Frota necessária | 11 | 15 | 12 | 8 | 11 | 15 | 12 | 8 |
| Demanda Pico | | | | | | | | |
| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| Passageiros | 933 | 1423 | 1095 | 776 | 954 | 1301 | 1100 | 683 |

2. Considerando toda 60% da demanda na linha Expressa

Tabela 7. Linha troncal terminal de Santa Maria/Rodoviária do Plano Piloto³ (Paradora)

| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Viagens do veículo por hora | 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 5 | 4 | 3 |
| Intervalo entre viagens (headway) | 20 | 12 | 15 | 20 | 20 | 12 | 15 | 20 |
| Frota necessária | 5 | 8 | 6 | 5 | 5 | 8 | 6 | 5 |
| Demanda Pico | | | | | | | | |
| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| Passageiros | 374 | 570 | 438 | 311 | 382 | 521 | 441 | 273 |

3. Considerando toda 40% da demanda na linha Paradora, veículo Articulado

Tabela 8. Linha troncal terminal de Santa Maria/Rodoviária do Plano Piloto⁴ (Paradora)

| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Viagens do veículo por hora | 3 | 5 | 4 | 3 | 3 | 4 | 4 | 3 |
| Intervalo entre viagens (headway) | 20 | 12 | 15 | 20 | 20 | 15 | 15 | 20 |
| Frota necessária | 5 | 8 | 6 | 5 | 5 | 6 | 6 | 5 |
| Demanda Pico | | | | | | | | |
| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| Passageiros | 249 | 380 | 292 | 208 | 255 | 348 | 294 | 182 |

4. Considerando toda 40% da demanda na linha Paradora, veículo Padron

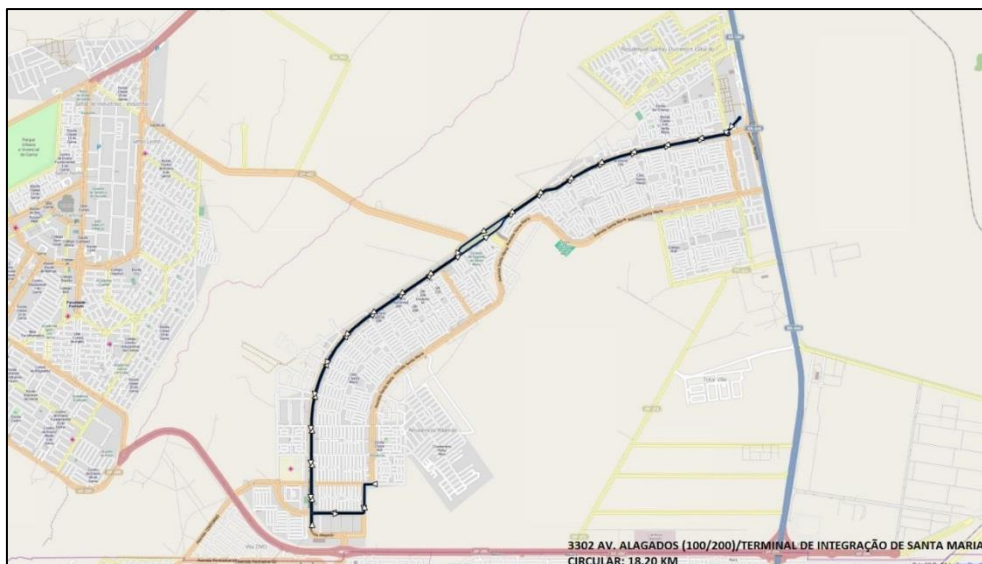


Figura 4. Linha alimentadora Avenida Alagados/Terminal de Santa Maria

Tabela 9. Linha alimentadora 33/02 Av. Alagados (100/200)

| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Viagens do veículo por hora | 14 | 19 | 15 | 11 | 12 | 16 | 13 | 7 |
| Intervalo entre viagens (headway) | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 5 | 9 |
| Frota necessária | 11 | 14 | 11 | 9 | 9 | 12 | 10 | 6 |
| Demanda Pico | | | | | | | | |
| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| Passageiros | 1052 | 1512 | 1185 | 864 | 935 | 1207 | 992 | 541 |

Tabela 10. Linha Alimentadora 33/01 Av. Alagados (300/400)

| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
|-----------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Viagens do veículo por hora | 5 | 7 | 5 | 3 | 5 | 7 | 7 | 7 |
| Intervalo entre viagens (headway) | 12 | 9 | 12 | 20 | 12 | 9 | 9 | 9 |
| Frota necessária | 3 | 5 | 3 | 2 | 3 | 5 | 5 | 5 |
| Demanda Pico | | | | | | | | |
| Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 |
| Passageiros | 370 | 500 | 382 | 218 | 397 | 547 | 552 | 502 |

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Análise das linhas troncais

Após o início da operação, foi realizada análise de dados levantados nos dias 0 nos dias 04 e 05 de agosto de 2014, nos terminais do BRT Sul de Santa Maria e Gama. Os dados de

número de viagens e dos veículos em operação foram feitos pela equipe de pesquisadores apoiadores que atuaram nos referidos terminais e na Rodoviária do Plano Piloto.

Foram feitas as coletas de dados a partir dos terminais do Gama e Santa Maria no sentido do Plano Piloto de Brasília. Consistiu na anotação do horário de partida e do número dos veículos. Na cidade do Gama os dados foram coletados de 5:35 às 19:49, última anotação em 04 de agosto e 19:32 no dia 05 de agosto. E em Santa Maria, de 5:31 às 19:45 dia 04 de agosto e 5:33 às 19:32 no dia 05 de agosto.

Estavam alocados nas datas da pesquisa a frota constante na Tabela 11, por serviço e origem, sob Ordens de Serviço nº 880-DTE/2014, 881 – DTE/2014, 864 – DTE/2014 e 865 – DTE/2014.

Considerou-se como frota operacional nos dias da pesquisa o que foi anotado pela equipe de campo supracitada. Assumiu-se como critério a anotação do número de registro dos veículos anotados. Dessa forma, foi considerado frota operacional mesmo que tenha sido feita apenas uma viagem pelo veículo. Na Tabela 12 tem-se o número de carros detectados por tipo de veículo e cidades no dia 04 de agosto.

Na Tabela 13 tem-se o número de carros detectados por tipo de veículo e cidades no dia 05 de agosto.

Na Tabela 14 tem-se os tempos médios de partidas saindo do Terminal do Gama, sem especificação do serviço, se Expresso ou Parador. Como não foi identificado o tipo de serviço na planilha do dia 04 de agosto utilizaram-se os dados totais de partidas. Verificou-se que na pior condição de oferta de serviço, na faixa horária de 11:00 às 12:00 o tempo médio de espera para a Rodoviária do Plano foi de 12 minutos.

Na Tabela 15 tem-se os tempos médios de partidas saindo do Terminal de Santa Maria, sem especificação do serviço, se Expresso ou Parador. Não houve anotação de dados na faixa horária de 18:00 no dia 04 de agosto.

Tabela 11. Número de veículos alocados por tecnologia

| Tipo de Serviço | Expresso | Parador | |
|------------------------|-------------------|-------------------|---------------|
| Tipo de Veículo | Articulado | Articulado | Padron |
| Gama | 12 | - | 13 |
| Santa María | 17 | - | 14 |
| Total | 29 | - | 27 |

Tabela 12. Número de veículos em operação em dia 04 de agosto

| Tipo de Veículo | Articulado | Articulado |
|------------------------|-------------------|-------------------|
| Gama | 21 | 13 |
| Santa María | 21 | 12 |
| Total | 42 | 25 |

Tabela 13. Número de veículos em operação em dia 05 de agosto

| Tipo de Veículo | Articulado | Articulado |
|------------------------|-------------------|-------------------|
| Gama | 19 | 11 |
| Santa María | 20 | 13 |
| Total | 39 | 24 |

Tabela 14. Headway médio, do total de partidas do BRT Sul, saindo do Gama

| | Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 09:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 |
|---------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Headway | 04/08/2014 | 00:10 | 00:04 | 00:04 | 00:03 | 00:06 | 00:08 | 00:12 | 00:08 |
| | 05/08/2014 | 00:06 | 00:04 | 00:03 | 00:05 | 00:05 | 00:09 | 00:10 | 00:09 |
| | Faixa Horária | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | |
| Headway | 04/08/2014 | 00:06 | 00:06 | 00:07 | 00:05 | 00:04 | 00:04 | 00:05 | |
| | 05/08/2014 | 00:06 | 00:07 | 00:07 | 00:06 | 00:03 | 00:03 | 00:05 | |

Tabela 15. Headway médio, do total de partidas do Eixo Sul, saindo de Santa Maria

| | Faixa Horária | 05:00 | 06:00 | 07:00 | 08:00 | 09:00 | 10:00 | 11:00 | 12:00 |
|---------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Headway | 04/08/2014 | 00:05 | 00:04 | 00:03 | 00:03 | 00:06 | 00:08 | 00:10 | 00:07 |
| | 05/08/2014 | 00:04 | 00:03 | 00:02 | 00:03 | 00:05 | 00:07 | 00:08 | 00:06 |
| | Faixa Horária | 13:00 | 14:00 | 15:00 | 16:00 | 17:00 | 18:00 | 19:00 | |
| Headway | 04/08/2014 | 00:08 | 00:05 | 00:12 | 00:04 | 00:03 | - | 00:02 | |
| | 05/08/2014 | 00:06 | 00:07 | 00:10 | 00:04 | 00:05 | 00:04 | 00:04 | |

Ressalta-se que apesar do número de veículos no período da pesquisa serem maiores que os programados no Tipo Articulado e menor no Padron, pode ter ocorrido substituição de veículo em operação, elevando o número total detectado na pesquisa.

O tempo de espera máximo no Gama foi de 27 minutos e 20 minutos, nos dias 04 de agosto e 05 de agosto respectivamente. Tanto em um dia quanto no outro, foi verificado apenas uma vez este intervalo de tempo. Quando excluiu-se estas anotações tem-se os tempos máximos de 17 minutos para o dia 04 de agosto, e 18 minutos para o dia 05/08/14.

O tempo de espera máximo em Santa Maria foi de 25 e 17 minutos, nos dias 04 de agosto e

05 de agosto respectivamente. Quando retirou-se o tempo máximo de espera no dia 04 de agosto que teve uma ocorrência, o tempo máximo de espera anotado foi de 20 minutos.

Apesar das partidas não estarem sendo feitas de acordo com o programado, os tempos de espera médio estão bem abaixo do que ocorriam nas duas cidades com destino à Rodoviária do Plano antes do início de operação do BRT Sul. Como havia dois corredores de transporte em Santa Maria e quatro no Gama os tempos de espera, em particular no “período de vale”, eram superiores aproximadamente a 3 vezes do que vem ocorrendo na média do BRT Sul.

6. CONCLUSÃO

O sistema tronco-alimentado como um todo propiciou ao usuário uma significativa redução de tempo da origem ao destino. O gargalo em percurso troncal foi eliminado com a adoção de corredor segregado na maior parte do percurso. Dentro das cidades do Gama e Santa Maria, os itinerários foram repensados de modo a reduzir o máximo possível o tempo em seu trajeto.

No total, o tempo de percurso completo ficou em torno de 50 minutos, contado o tempo de espera. Levando em consideração que a distância percorrida é de 43 km, tem-se aqui um dos mais rápidos sistemas de transporte público do país. Mesmo que o BRT Sul ainda não apresente atualmente os componentes: estações, veículos, serviços, vias e, principalmente, os elementos de sistema inteligente de transporte (ITS).

A pesquisa proporcionou ainda a constatação de que o enfoque na composição de um sistema integrado de transportes com serviços tronco-alimentados e terminais de integração é de grande utilidade para os sistemas de transporte público coletivo por ônibus, uma vez que possibilita a racionalização da operação do serviço, com melhor aproveitamento da frota e redução de custos operacionais.

REFERÊNCIAS

- BOYNE, G. A. Y CHEN, A. (2006). *Performance Targets and Public Service Improvement*. Journal of Public Administration Research and Theory, 17, 455-477.
- CAIAFA, J. (2002). *Jornadas Urbanas: exclusão, trabalho e subjetividade nas viagens de ônibus na cidade do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro: FGV.
- DISTRITO FEDERAL. (2007). *Dispõe sobre os serviços de transporte público coletivo integrantes do Sistema de Transporte do Distrito Federal, instituído pela Lei Orgânica do Distrito Federal, e dá outras providências*. Lei nº 4.011, de 12 de setembro de 2007. Distrito Federal, Brasília, 13 set. 2007.
- KON, A. (1995). *Estruturação Ocupacional Brasileira: Uma Abordagem Regional*. Brasília: SESI.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. (2008). *Manual de BRT - Bus Rapid Transit - Guia de Planejamento*. Brasília: Ministério das Cidades.

RIBEIRO, S. K. (org). (2001). *Transporte Sustentável: alternativas para ônibus urbanos*. Rio de Janeiro: COOPE/UFRJ.

RODRIGUES, E. (2014). *Metodologia para investigação da percepção das inovações na usabilidade do sistema metroviário: uma abordagem antropotecnológica*. 2014. 262 f. Tese (Doutorado) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília.

SMOLKA, M. O. (2009). *Tributação Imobiliária e Instrumentos de Política Urbana*. Brasília: Seminário Nacional “Diretrizes Nacionais para o Cadastro Territorial Multifinalitário”.

VASCONCELLOS, E. A. (2005). *A cidade, o transporte e o trânsito*. São Paulo: Prolivros.

15 Estimación de la matriz origen-destino de los viajes en el sistema de transporte interno de Ciudad Universitaria de la Universidad Nacional Autónoma de México

Sonia Marcela Cifuentes Martínez

Angélica Lozano

Universidad Nacional Autónoma de México, México

RESUMEN

El campus universitario (Ciudad Universitaria, CU) de la Universidad Nacional Autónoma de México posee su propio sistema de transporte interno llamado Pumabús. Este sistema está conformado por 88 paradas, 12 rutas y 57 autobuses. En la actualidad no se cuenta con ningún estudio acerca de los patrones de viajes que se presentan al interior de CU. En el presente trabajo se propone y aplica una metodología para obtener la matriz origen-destino de los viajes internos realizados en Pumabús. La información base utilizada fue extraída de la Encuesta Origen-Destino 2007 de la Zona Metropolitana del Valle de México, la cual proporciona información sobre los viajes que se realizaron en dicho año; en particular se extrajo información de los viajes realizados con destino u origen en CU. Dicha encuesta consideró a CU como una sola zona, por lo cual no obtuvo información de los viajes internos de CU. Se utilizó el Factor de Crecimiento para actualizar la información de viajes al año 2015, a partir del crecimiento del número de alumnos, académicos y trabajadores en CU. La matriz origen-destino interna de viajes en Pumabús, para cada una de las horas de máxima demanda determinadas, fue obtenida mediante la similitud con el Problema de la P-Mediana y el uso de herramientas de Teoría de la Utilidad y el proceso Analítico Jerárquico.

1. INTRODUCCIÓN

Una matriz origen-destino se representa mediante una tabla que ordena en filas y columnas el resultado de los viajes generados desde un origen (nodo i) hacia un destino (nodo j). Las filas corresponden a los sitios donde se generan los viajes (orígenes) y las columnas corresponden a los sitios donde los viajes terminan (destinos), las celdas contienen el número de viajes que se realizan del nodo origen al nodo destino en determinado tiempo.

La matriz origen-destino puede ser obtenida a partir de información de encuestas origen-destino, las cuales permiten recabar información acerca de los motivos de los viajes, los modos utilizados, el tiempo utilizado para realizar los viajes, entre otras. Para estas encuestas es de vital importancia identificar el tamaño de muestra apropiado para garantizar resultados fiables (Parra y Padilla, 2009). Entre las limitaciones de este método de obtención de matrices origen-destino está la gran cantidad de tiempo y recursos económicos invertidos en

su ejecución. También es posible realizar una estimación de la matriz origen-destino utilizando resultados de estudios origen-destino anteriores (matriz origen- destino base) junto con información adicional, tal como la de aforos vehiculares.

Las herramientas que se utilizan para la estimación de la nueva matriz origen-destino se dividen principalmente en dos categorías: la primera es mediante Factor de Crecimiento y la segunda es mediante Modelos Sintéticos. El Factor de Crecimiento se basa en el supuesto de que la distribución de viajes futuros será similar a la actual, y los métodos más comunes en esta categoría son: Método de factor uniforme, Método del factor promedio, Método Fratar, Método Detroit y el Método Furness. Los métodos sintéticos obtienen una serie de características de los viajes de las tablas origen-destino actuales y a partir de éstas pueden predecir la distribución futura; entre ellos se encuentran: el Modelo de gravedad, el Modelo electrostático, el Modelo de oportunidades, y el Modelo de regresión lineal múltiple (Ortúzar, 2012).

Otro procedimiento para estimar la matriz origen-destino es utilizando aforos de tránsito. Los aforos vehiculares miden la cantidad de vehículos que transitan por determinado punto, con clasificación por tipo de vehículo. Hay aforos permanentes y aforos que se componen de mediciones sólo para algunos días del año. Este tipo de procedimiento posee la ventaja de ser sencillo y ofrece buenas estimaciones (Gómez, 1991).

2. OBTENCIÓN DE LA MATRIZ ORIGEN-DESTINO DE CIUDAD UNIVERSITARIA

2.1 Información disponible

Actualmente CU no cuenta con ninguna información acerca de los viajes realizados en su interior. La única fuente de información disponible es la matriz origen-destino para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) que contiene información de los viajes atraídos y generados por la zona CU (viajes externos), en los modos de transporte público que conectan a CU con el resto de la metrópoli y en vehículos particulares. Los viajes externos en transporte público inician o terminan en estaciones externas a CU, es decir en las paradas o estaciones fuera del campus universitario; por ejemplo, los viajes atraídos o generados en metro, llegan o parten desde alguna de sus dos estaciones ubicadas justo en la periferia de CU. En general, los viajes en vehículos privados llegan a los estacionamientos ubicados dentro de CU.

A partir de la información de viajes externos, se desea obtener la matriz origen- destino interna de CU, y en específico de los viajes realizados en el sistema de transporte universitario gratuito llamado Pumabús. La información de viajes internos es útil para redefinir las 12 rutas del Pumabús, tanto en los recorridos como en las frecuencias de paso.

El análisis de los viajes externos que llegan y salen de CU durante el día, permitió identificar

las dos horas de máxima demanda (HMD) más importantes, para las cuales obtener la matriz origen-destino dentro de CU.

2.2 Determinación de la Demanda de Cada Nodo

Dado que el objetivo es obtener la matriz origen- destino de viajes que se realizan en Pumabús, se considera que las paradas de este sistema de transporte son los nodos origen o los nodos destino.

Para los viajes atraídos en cada modo de transporte, la demanda o el total de viajes que llegan a cada nodo destino se calculó como el producto del total de viajes atraídos en un determinado modo y el porcentaje de usuarios totales en cada nodo, que incluye personal académico, laboral y estudiantil. De igual forma para los viajes generados, el total de viajes que salen de cada nodo se calculó como el producto del total de viajes generados en un determinado modo de transporte y el porcentaje de usuarios en cada nodo.

El número de usuarios en un nodo se basa en la matrícula estudiantil y el número de académicos y de trabajadores en las facultades, edificios e institutos cercanos al nodo; así por ejemplo, la población de la parada “Contaduría” está conformada por una proporción de población de la Facultad de Contaduría y Administración y del edificio de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGCTIC).

La asignación de los porcentajes de usuarios de las facultades, los institutos y demás edificios a cada parada aledaña, se realizó de forma proporcional, por ejemplo, la población de la Facultad de Contaduría y Administración se dividió en partes iguales entre las paradas “Contaduría” y “Cómputo académico” por ser las más cercanas y tener direcciones diferentes, es decir se consideró que no todos los viajes se realizan en la misma dirección. Estas paradas a la vez contienen porcentajes de usuarios provenientes de edificios como la DGCTIC. Para el caso de la Escuela Nacional de Trabajo Social, los usuarios se dividieron proporcionalmente a la cantidad de paradas inmediatamente cercanas y de dirección diferente, “Trabajo Social”, “Metrobús Ote” y “Metrobús Sur” (ver Figura 1)

2.3 Relación entre los viajes en las paradas o estaciones externas y los viajes internos

A continuación, se presenta el procedimiento para asignar los viajes de las paradas o estaciones externas, a las paradas del Pumabús, para cada modo externo.

2.3.1 Paradas o estaciones externas

Los viajes que se generan o que son atraídos en cada una de las estaciones externas a CU, es decir en cada una de las dos estaciones del metro, en cada una de las tres paradas del BRT cercanas (Metrobús) y en cada parada de los autobuses de la ciudad, fueron obtenidos a partir de la matriz de viajes externos por modo. Cabe recordar que todas estas paradas y estaciones están ubicadas fuera de CU, a pocos metros del límite de CU.



Figura 1. Ejemplo de asignación de usuarios a las paradas del Pumabús

La matriz origen-destino de la ZMVM contiene el total de personas que ingresan (viajes atraídos) y egresan (viajes generados) de CU mediante los diferentes modos de transporte (metro, BRT, autobuses de la ciudad y autobuses de rutas concesionadas, entre otros), pero no contiene información acerca de las estaciones en las cuales los usuarios finalizan o inician sus recorridos externos a CU.

Para cada modo de transporte externo, hay varias estaciones o paradas posibles que el usuario puede utilizar. Por ejemplo, un usuario del sistema de transporte Metro que tiene por destino CU, tiene dos opciones, terminar su viaje en la estación Metro Copilco o en la estación Metro Universidad, ambas estaciones ubicadas en la periferia de CU; dependiendo de dónde viene el usuario en la ZMVM y a dónde va dentro de CU, éste decide qué estación utilizar. Si un usuario decide terminar su viaje externo en la estación Copilco, entonces las posibles paradas del Pumabús en las cuales podría iniciar su recorrido al interior de CU son: “Odontología”, “Medicina” o “Salida de medicina”; si por el contrario decide terminar su viaje en la estación Metro Universidad, entonces las posibles paradas del Pumabús en las cuales podría iniciar su recorrido al interior de CU son “Metro Universidad Oriente” o “Metro Universidad Poniente”. Como se explicará más adelante se consideran las paradas del Pumabús que se encuentran a una distancia cercana que pueda ser recorrida a pie.

La relación entre las paradas y estaciones externas a CU y las paradas del Pumabús, es similar para los viajes con origen CU y para aquellos con destino CU. Por ejemplo, un estudiante que desea realizar un viaje con origen CU hacia un destino cualquiera en la ZMVM, en el modo de transporte público trolebús tiene dos opciones, abordar en la estación de trolebús cercana al Estadio Olímpico o en la estación ubicada en avenida Universidad; su decisión depende de dónde originó su viaje al interior de CU, lo que a su vez determina en qué parada del Pumabús descender.

Por lo anterior, se hace necesario realizar la distribución del total de viajes atraídos o generados de CU entre las posibles estaciones externas propias de cada modo de transporte. A continuación, se presentan las estaciones donde el usuario puede descender o abordar cada modo de transporte externo (ver Figura 2):

- Metro: Estación Metro Copilco y Estación Metro Universidad.
- BRT: Estación Doctor Gálvez, Estación Metrobús Universidad y Estación Centro Cultural.
- RTP (autobús de la ciudad): Estación Metro Universidad y Estación Avenida Universidad.
- Trolebús: Estación Trolebús Estadio Olímpico y Estación Avenida Universidad.
- Colectivo (autobús de ruta concesionada): Estación Avenida Universidad, Estación Avenida del Imán, Estación Metro Copilco y Estación Metro Universidad.
- Autobús suburbano: Estación ubicada al interior de CU cercana al Estadio de Prácticas.

Los viajes que son atraídos o generados en CU en los modos de transporte moto, taxi y bicicleta, llegan a su destino final dentro de CU o salen de su origen en CU utilizando este mismo modo, por lo cual no utilizan el Pumabús y no forman parte de la matriz interna de viajes que se desea obtener. Al interior de CU existen múltiples estacionamientos para motos y bicicletas, en los puntos de destino final u origen dentro de CU. Los viajes en auto particular que quedan en los estacionamientos lejanos a las áreas de Facultades e Institutos sí utilizan el Pumabús.

Para cada modo, la asignación de viajes atraídos o generados en cada una de las estaciones de transporte público externo a CU, se realizó mediante una similitud con un Problema de la P-Mediana; en este problema el objetivo es encontrar la “mejor” ubicación para p -número de plantas que sirven a n puntos de demanda, con el objetivo de minimizar el total de la distancia ponderada. La formulación de este problema se presenta en las Ecuaciones 1 a 5.



Figura 2. Estaciones de Transporte Público Externo de CU

$$\text{Minimizar } \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (1)$$

$$\sum_j X_j = p \quad (2)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (3)$$

$$X_j = 0,1 \quad \forall j \quad (4)$$

$$Y_{ij} = 0,1 \quad \forall i, j \quad (5)$$

Donde

h_i = demanda del nodo i

d_{ij} = Distancia entre el nodo i y la planta j

$Y_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si la planta ubicada en } j \text{ atiende al nodo } i \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$

$X_j = \begin{cases} 1 & \text{Si una planta es ubicada en } j \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$

La primera restricción busca que la demanda de cada nodo i sea satisfecha. La segunda restricción establece que P -plantas deben ser localizadas. La tercera restricción obliga a asignar los nodos demanda sólo a plantas abiertas. La cuarta restricción establece que las variables de localización sean binarias. Y la última restricción obliga a asignar cada nodo demanda a una sola planta, en este caso a la más cercana; esta última restricción puede cambiar a $Y_{ij} \geq 0$ sólo si existe diferencia entre los costos unitarios de transporte en los que hay lugar entre un nodo demanda y cada una de las plantas, entonces la asignación a cada una de las plantas puede ser parcial. La solución de este modelo es la mejor ubicación para cada una de las plantas y simultáneamente, se obtiene la asignación de qué planta provee a cada cliente.

Para la asignación de los viajes atraídos o generados de las paradas o estaciones externas, a cada una de las paradas del Pumabús, no es necesario ubicar las estaciones (las plantas) puesto que éstas ya existen y su localización no se puede cambiar, tan sólo es necesario asignar las paradas Pumabús con su respectiva demanda a las estaciones o paradas externas.

En el problema básico del P-Median Problem, como ya se explicó anteriormente, cada nodo demanda se asigna a la estación más cercana; sin embargo, para algunos de los viajes realizados dentro de CU no se considera sólo la distancia, sino que además se consideran otros atributos que conforman una función objetivo multiatributo; estos atributos son descritos en el siguiente apartado.

2.3.2 Atributos para la asignación

La asignación de viajes externos a paradas del Pumabús se realizó de acuerdo con los tres atributos siguientes:

D_{ij} =Distancia en línea recta entra la estación externa i y la parada del Pumabús j . Se utilizó la distancia en línea recta, puesto que recurrir a las distancias determinadas por las direcciones de las vías de CU implicaría suponer que todos los viajes internos se realizan en Pumabús.

A_i = Accesibilidad de la estación externa i , tomando el término “accesibilidad” para hacer referencia al número de paradas del Pumabús a menos de trescientos metros; se consideró el razonamiento de que entre mayor sea el número de paradas cercanas a una estación externa, más atractiva es para el usuario porque probablemente cerca transiten más rutas y por lo tanto hay más frecuencia en el paso de los autobuses.

T_i = Tipo de Estación i , que hace referencia a si la estación externa en cuestión es o no terminal. Se considera que los usuarios prefieren abordar en una estación donde inicia la ruta, ya que al ser los primeros usuarios en ingresar al sistema tienen más probabilidad de encontrar un asiento disponible para realizar su viaje. También se asume que prefieren terminar el viaje en la estación terminal porque hay más opciones para continuar su viaje.

La preferencia por las terminales aplica para todos los modos excepto el BRT (Metrobús), ya que ninguna de las tres estaciones consideradas (Doctor Gálvez, Universidad y Centro Cultural) es un terminal; en este caso se consideró la afluencia de cada estación como sustituto al tipo de estación, asumiendo que la afluencia puede dar información acerca del grado de seguridad de una estación, por cuanto entre mayor sea el número de usuarios más cuidada es la estación.

Para obtener una función objetivo en términos de los tres atributos, D_{ij} , A_i y T_i , fue necesario unificar escalas mediante Teoría de Utilidad, para la accesibilidad, tipo de estación y grado de seguridad se recurrió a las siguientes preguntas, respectivamente: Dado un número determinado de paradas del Pumabús cercanas a la estación externa, del modo en el cual se transporta, ¿cuántos metros está dispuesto a caminar para llegar a su destino sin utilizar el Pumabús?, ¿cuántos metros está dispuesto a caminar hacia la terminal del sistema de transporte externo que utiliza, si usted tiene mayor probabilidad de que encontrará un asiento disponible para su viaje? y ¿cuántos metros está dispuesto a caminar para abordar o finalizar su recorrido en una estación con mayor seguridad?

Estas preguntas deben ser formuladas a los usuarios de los sistemas de transporte público para identificar sus patrones de decisión. En este caso, sólo con el fin de probar el procedimiento, las respuestas a estas preguntas fueron obtenidas con supuestos basados en información reducida. El resultado es la conversión de las unidades de cada uno de los atributos a metros. La Tabla 1 muestra la comparación de los tres atributos en metros, para cada modo de transporte público externo.

El procedimiento antes descrito no considera al modo autobús suburbano (que conecta CU con zonas en las orillas de la ZMVM), debido a que sólo hay una estación de dicho modo en CU.

2.2.3 Proceso Analítico Jerárquico

Un Proceso Analítico Jerárquico fue llevado a cabo para obtener los pesos a utilizar en la función multiatributo considerada como costos. Es importante mencionar que este proceso debe ser realizado por expertos o bajo la aplicación de encuestas que permitan identificar los patrones de decisión de los usuarios; en este caso se realizó bajo supuestos para probar el procedimiento. La comparación de atributos se realizó de acuerdo a la escala propuesta por Saaty y Vargas (2001). El atributo de la accesibilidad se consideró moderadamente más importante que el de la distancia, ya que en una estación donde hay más paradas cercanas de Pumabús (distancia <300), también hay más posibilidad de que más rutas pasen por esa parada, y por lo tanto mayor frecuencia de paso de autobuses y posibilidad de tomar una ruta sin transferencias (cambios de línea). En caso contrario, de que un usuario se encuentre en una estación más cercana al destino final, pero con baja accesibilidad, el número de rutas y vehículos que pasen es reducido y el tiempo de espera posiblemente sea mayor.

Tabla 1. Equivalencia de los atributos en metros

| Estación o parada externa | Accesibilidad (m) | Terminal (m) | Seguridad (m) |
|------------------------------------|--------------------------|---------------------|----------------------|
| Estación Metro Copilco | 350.00 | 0.00 | |
| Estación Metro Universidad | 300.00 | 400.00 | |
| Estación Metrobús Centro Cultural | 100.00 | | 0.00 |
| Estación Metrobús CU | 0.00 | | 100.00 |
| Estación Metrobús Doctor Gálvez | 426.67 | | 350.00 |
| Estación Avenida Universidad | 100.00 | 0.00 | |
| Estación Trolebús Estadio Olímpico | 350.00 | 400.00 | |
| Estación Avenida el Imán | 300.00 | 0.00 | |

El atributo tipo de estación se considera extremadamente más importante que el de la distancia, ya que en general un viaje externo (fuera de CU) es mucho más extenso que la espera del autobús del sistema Pumabús. Por esta misma razón, el atributo tipo de estación se considera fuertemente más importante que el atributo de accesibilidad. Estas relaciones entre los tres atributos también fueron consideradas para el BRT.

En las Ecuaciones 6 y 7 se presentan las ponderaciones resultado del Proceso Analítico Jerárquico, para cada uno de parámetros de las funciones objetivo con índices de inconsistencia admisibles.

$$w = 0.0685 * D_{ij} - 0.1548 * A_i + 0.7765 * T_i \quad (6)$$

$$w_{BRT} = 0.122 * D_{ij} - 0.6479 * A_i + 0.2298 * S_i \quad (7)$$

Dado que la función objetivo está concebida como un costo, se analiza si los criterios determinan en realidad un costo o no. Así que, si el atributo contribuye al costo, el signo de la ponderación será positivo, mientras que, si el criterio genera un beneficio en el confort del viaje externo, el signo de la ponderación será negativo. De aquí que las ponderaciones en la función objetivo de los criterios de accesibilidad, tipo de estación y seguridad de una estación, tienen signo negativo puesto que se considera que llegar a (o dejar) una estación tipo terminal o una estación más segura permite un viaje externo más confortable.

2.2.4 Asignación de viajes a las paradas del Pumabús

Una vez obtenidas las funciones multiatributo, se realiza la asignación de viajes de cada modo de transporte a cada una de las paradas del Pumabús posibles. Sin embargo, no siempre las decisiones son guiadas por estas funciones multiatributo, dado que hay circunstancias particulares que hacen que se amplíen las decisiones del viaje. Para el atributo de la distancia, se toman en cuenta las dos opciones siguientes:

d_{i1} =Distancia entre el nodo i a asignar y la estación externa primera más cercana

d_{i2} =Distancia entre el nodo i a asignar y la estación externa segunda más cercana

Sólo se hace uso de la función multiatributo si la diferencia entre estos dos valores es menor que cuatrocientos metros, en caso contrario se considera solamente la estación externa más cercana. Se consideran cuatrocientos metros porque es la mayor distancia que está dispuesto a recorrer un usuario, según el procedimiento realizado para la unificación de unidades. El resultado hasta el momento es la asignación de viajes por cada uno de los modos de transporte a las diferentes paradas del Pumabús.

En el caso de los viajes atraídos o generados en CU mediante automóvil, se considera que un porcentaje de estos viajes llega directamente a su destino dentro de CU, como es el caso de los viajes realizados por el personal académico y laboral, puesto que este personal dispone de estacionamientos cercanos a su dependencia. El otro porcentaje de viajes (resto de los viajes) utiliza estacionamientos públicos de estudiantes y visitantes, la mayoría lejanos a las Facultades e Institutos, por lo que estos viajes además utilizan algún otro modo de transporte al interior de CU (caminar o Pumabús) para trasladarse entre el estacionamiento y su punto de estudio, trabajo o visita.

El número de viajes en automóvil que deben utilizar un estacionamiento público es el que se considera (junto con los de los otros modos) para la determinación de la matriz origen-destino de los viajes internos en Pumabús.

El porcentaje de viajes en automóvil con destino final dentro de CU que usa Pumabús, fue estimado como el complemento de la relación entre los usuarios de la población académica y laboral con respecto a la población total de CU. De esto resulta que aproximadamente el 34% de los viajes atraídos o generados en automóvil llegan o salen directamente de su lugar de trabajo, mientras que el 66% debe utilizar un estacionamiento público. Este 34% de los viajes en automóvil no es considerado, así como tampoco el porcentaje de viajes en automóvil que tienen el propósito de recoger o dejar a alguien, ya que estos vehículos no hacen uso de los estacionamientos públicos y su ingreso a CU es por unos minutos.

La asignación de los viajes en automóvil a los estacionamientos públicos de CU requiere antes hacer la conversión de unidades, esto es cambiar número de viajes por número de automóviles. Esto se logra utilizando el factor que determina cuantas personas en promedio viajan en un automóvil, cuando se tiene por origen o por destino a CU. Este factor es de 1.2636 pasajeros/vehículo, y fue calculado a partir de la matriz origen-destino de la ZMVM.

CU cuenta con 24 estacionamientos públicos controlados y también cuenta con estacionamientos no controlados ubicados en la vía pública. Para referenciar geográficamente los estacionamientos no controlados en vía pública se utilizó el punto medio para cada trazo, y su capacidad se obtuvo como el cociente entre la longitud total disponible para estacionarse

y el tamaño longitudinal de un vehículo promedio (4.3 m).

La asignación de viajes a cada uno de los estacionamientos públicos se basó únicamente en el criterio de la distancia, considerando el sentido de las vías en CU. Así el total de viajes atraídos o generados en automóvil por cada parada del Pumabús, se calculó con base en el número de usuarios de estacionamientos públicos y el número de automóviles atraídos o generados en las horas de máxima demanda. En la Figura 3 se presenta el pseudocódigo de asignación de viajes atraídos y generados entre la hora X y $X+1$ del día; el pseudocódigo se corrió para las horas de máxima demanda, es decir hasta $X=7$ horas y $X=15$ horas.

En la fila 1 se inicia el ciclo para cada una de las horas del intervalo de tiempo a modelar. De la fila 2 a la 7 se extraen los viajes generados de cada parada del Pumabús, estos viajes extraídos representan los viajes que se realizan de cada parada del Pumabús hacia cada uno de los estacionamientos a los cuales se les asignaron viajes en $t-1$. De igual forma las capacidades remanentes de los estacionamientos se actualizan, al ser viajes generados se liberan cupos. Entre las líneas 8 a la 14, los viajes atraídos en la hora t por cada una de las paradas son asignados al estacionamiento p más cercano, sin importar que la capacidad de este estacionamiento sea nula; la variable A_p es el contador de automóviles que ingresan a cada uno de los estacionamientos. De la fila 15 a la 20 se inicia un contador de estacionamientos que sobrepasan su capacidad. La fila 21 establece que, si el número de estacionamientos con sobrecupo es mayor que uno, entonces se procede a reasignar la cantidad de viajes que superan la capacidad del estacionamiento.

De la fila 22 a la 34 se reasignan los viajes del sobrecupo de cada estacionamiento, al estacionamiento segundo más cercano cuya capacidad no haya sido excedida, en forma proporcional a los viajes asignados de cada una de las paradas. Una vez realizada la reasignación, el contador de los estacionamientos con sobrecupo se reduce en una unidad y si el estacionamiento segundo más cercano al cual se le reasignaron los viajes ha sobrepasado su capacidad, el contador se incrementa en una unidad. Hasta aquí se tiene la asignación de estacionamientos a cada uno de los viajes, tanto generados como atraídos de paradas del Pumabús. Como se mencionó para la asignación de automóviles a los estacionamientos públicos, fue necesaria la conversión del número de viajes al número de vehículos; ahora como se trata de viajes internos de usuarios, en modos de transporte internos, es necesario obtener el número de personas que viajan, para ello se multiplican los automóviles por 1.2636 [pas/veh]. Es decir, se realizó la asignación de automóviles a los estacionamientos, y la asignación de los viajes de pasajeros (con automóvil como modo externo) a las paradas del Pumabús.

```

1. For t= 1 to X (de 1 am a X horas)
2. If t <> 1 then
3.     Demanda Paradai = Total Viajes Generadost * % población Paradai
4.     Vzi = %viajes asignados al estacionamiento zt-1 * Demanda Paradai
5.     Capacidad Estacionamiento Z = Capacidadt-1 + Vzi
6. Else
7. End if
8. For i = 1 to 82
9. Demanda Paradai = Total Viajes Atraídost * % población Paradai
10. Asignaciónip = 1
11. AsigEstacionamientot = AsigEstacionamientot + Demanda Paradai
12. Aip = Demanda Paradai
13. Ap = Ap + Demanda Paradai
14. Next i
15. For p=1 to 32
16. If Ap > CEp Then
17.     R=R+1
18. Else
19. End if
20. Next p
21. Do while R>0
22. For p= 1 to 32
23. If Ap > CEp then
24. For i = 1 to 82
25. If Asignaciónip = 1 then
26. Reasignari2p = (Ap - CAp) * (Aip/AsigEstacionamientot)
27. R=R-1
28. if A2p > C2p then
29.     R=R+1
30. Else
31. End if
32. End if
33. Next i
34. Next p
35. Loop
36. Next t

```

Figura 3. Pseudocódigo para la asignación de viajes atraídos y generados en automóvil

2.3 Matriz origen-destino por modo de transporte

Los viajes asignados a las estaciones de cada uno de los modos de transporte externos fueron a su vez asignados a las paradas internas del Pumabús encontradas a distancias en líneas rectas menores o iguales a 428 metros (paradas origen o destino). Este parámetro se fijó de acuerdo a las distancias que los peatones están dispuestos a caminar según Ortiz, Esquivel y Hernández (2012). No obstante, los resultados no fueron coherentes para algunas paradas del Pumabús, por ejemplo a los viajes que llegan o salen de la estación Metro Universidad se les asignaba como posible nodo origen o nodo destino la parada “Química conjuntos D y E”, la cual a pesar de estar dentro de la distancia permitida, no es posible que una persona

que ingrese por Metro CU se traslade hasta esta parada para iniciar su viaje dentro de CU dado que esta parada no presenta características que la hagan atractiva para iniciar o finalizar un viaje y que sus atributos justifiquen la distancia a recorrer desde el Metro CU.

Con base en lo anterior se decidió reducir el radio de asignación a 370 metros, excepto para la estación de Metrobús Doctor Gálvez y Estación Metro Universidad, cuyas únicas conexiones a CU son más largas. Para la estación de Metrobús Doctor Gálvez, el tener 428 metros de radio implicaba la no asignación de nodos origen o destino, es decir no podía contener viajes con origen o destino CU lo cual no concuerda con la realidad, por lo cual se le asignó un radio de 800 metros, que es lo mínimo para cubrir las paradas del Pumabús más cercanas (Avenida Universidad, Derecho norte, Filosofía sur y norte, obras y construcción, Psicología y Relaciones laborales). En cuanto a la estación Metro Universidad se trabajó con un radio de 200 metros, lo necesario para cubrir las paradas del Pumabús “Metro Universidad oriente y Metro Universidad poniente”. Con los radios mencionados, se obtuvieron los nodos origen o destino, para cada estación externa.

En cuanto a las paradas asignadas a cada estacionamiento, el radio de asignación de nodos origen o nodos destinos fue de 100 metros para estacionamientos ubicados en el Estadio Olímpico de CU, a excepción del estacionamiento E4 para el cual se cree necesario que los viajes deben llegar tanto a la parada E4 como a UDUAL. La elección depende en la dirección en la que va el viaje. Para el resto de los estacionamientos públicos, el radio de asignación de los nodos origen o nodos destino fue de 160 metros.

Finalmente, cada una de las paradas del Pumabús se asigna al nodo origen o destino (dependiendo si es viaje de atracción o un viaje de generación) más cercano, a la cual fue asignando en la sección 2.2.4.

2.4 Matriz Origen-Destino Interna en Pumabús

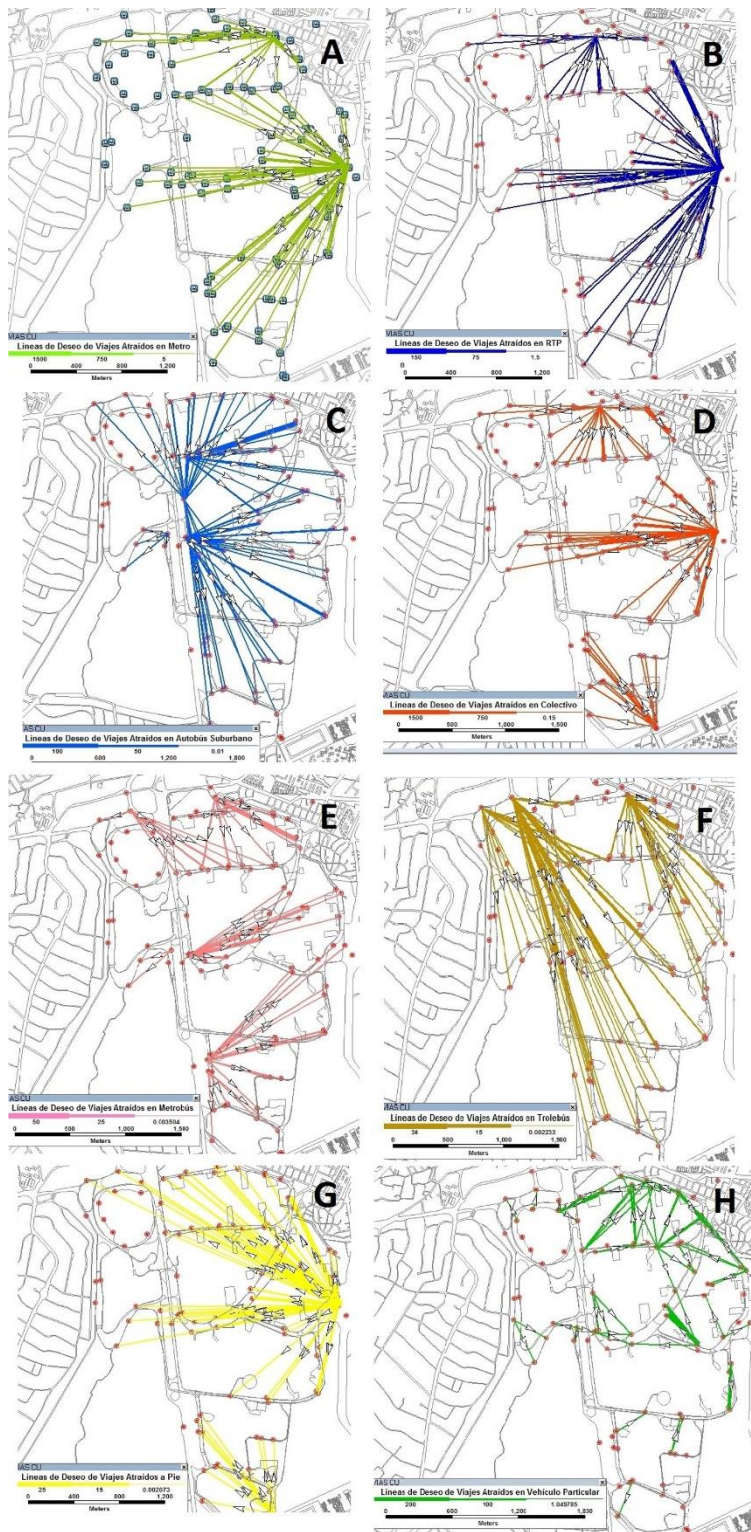
Para generar la matriz de viajes internos realizados únicamente en el Pumabús, se eliminaron los viajes internos a pie y en bicicleta, con base en los datos obtenidos de una encuesta aplicada a 50 estudiantes, que da información acerca de las preferencias de los usuarios en cuanto a modos de transporte interno. A continuación, se describe el procedimiento utilizado:

1. Quitar el porcentaje de viajes que pueden recorrerse a pie: Según Molinero Molinero y Sánchez Arrellano (1997) el radio de distancia a una estación, en la cual ya no existe porcentaje de viajes que se realizan a pie, es de 1150 metros; sin embargo, si se considera que los peatones ya han recorrido una distancia considerable entre las estaciones externas y las paradas origen o para el caso de viajes generados, entre las paradas destino y las estaciones externas, la distancia que se espera que estén dispuestos a recorrer a pie dentro de CU se reduce; concretamente se denota “la diferencia dispuestos a recorrer a pie dentro de CU” como la diferencia entre 1150 metros y la distancia entre los orígenes o destinos

asignados para un viaje y la estación externa (estación externa i , origen o destino j). Para viajes internos cuya distancia más corta (según los sentidos de vialidades) esté entre 0 y “la diferencia dispuestos a recorrer a pie dentro de CU”, el viaje se elimina de la matriz origen- destino del sistema de transporte interno Pumabús, puesto que se espera que se realice a pie.

2. Quitar el porcentaje de viajes que se puede hacer en el modo de transporte interno Bicipuma (bicicletas de préstamo gratuito). De la matriz origen-destino obtenida después de quitar los viajes que se pueden realizar a pie, es necesario también disminuir los viajes que se pueden realizar en Bicipuma; según la encuesta aplicada, el porcentaje de los viajes en Bicipuma es del 2.2%. Para disminuir los viajes en este porcentaje se identificaron los viajes que se pueden realizar en Bicipuma, es decir para los que existe un centro Bicipuma cercano (a un radio de 100 metros) tanto al origen como al destino del viaje, concretamente el origen y el destino del viaje debe ser alguna de las siguientes paradas: Medicina, Derecho Sur, Filosofía y Letras Sur, Arquitectura, Ingeniería Norte, Química, Camino Verde, Ciencias Políticas, Metro Universidad Ote, Metrobús CU Ote, MUCA, Ciencias por Circuito de la Investigación Nte, Ciencias por Circuito de la Investigación Sur, Instituto de Astronomía, Química Conjunto D y E.

Para el caso de los viajes atraídos y generados en vehículo particular, según la encuesta aplicada, no existen usuarios que prefieran utilizar este modo de transporte, hecho que se acerca a la realidad debido a que los usuarios tienden a estacionar el vehículo lo más cercano posible a su destino dentro de CU, y en caso de utilizar estacionamientos lejanos (como los de los de la Zona Cultural o del Estadio Olímpico) no es factible usar estas bicicletas porque no hay centros Bicipuma cercanos. La Figura 4 muestra las líneas de deseo de los viajes internos de CU.



- (A) Deseo de viajes atraídos en Metro
 (B) Deseo de viajes atraídos en RTP
 (C) Deseo de viajes atraídos en autobús suburbano
 (D) Deseo de viajes atraídos en colectivo
 (E) Deseo de viajes atraídos en Metrobús
 (F) Deseo de viajes atraídos en Trolebús
 (G) Deseo de viajes atraídos a pie
 (H) Deseo de viajes atraídos en vehículo particular

Figura 4. Líneas de deseo de viajes internos en CU

Este procedimiento arroja una matriz OD de 13,436 viajes internos para la primera hora pico (7:00 a 8:00 am) y 12,911 viajes entre las 3:00 a 4:00 pm, sin embargo, el Pumabús cuenta generalmente con tan solo 33 y 28 vehículos para la primera y segunda hora pico respectivamente, esto en términos de capacidad mínima (si se considera que todos los viajes son directos y tienen la misma distancia de recorrido) es de 2,889 y 2,357 usuarios. Tomando esta capacidad como una cota inferior del sistema, la actual matriz OD como un patrón de viajes a seguir y la distancia a recorrer en cada viaje, se obtiene la matriz OD de viajes que se puede atender con la flota actual del sistema para cada hora, mediante las ecuaciones 8 y 9:

$$x_{ij} = IC * \left(\mu * \left(\frac{OD_{ij}}{\sum_i \sum_j OD_{ij}} \right) + \beta * \left(\frac{D_{ij}}{\sum_i \sum_j D_{ij}} \right) \right) \quad (8)$$

$$\mu + \beta = 1 \quad (9)$$

Donde:

IC: Cota inferior de capacidad,

μ : Peso de importancia del patrón de viajes dado por la demanda de viajes entre el origen i y el destino j,

OD_{ij} : Número de viajes patrón entre el origen i y el destino j ,

β : Peso de importancia de la distancia del viaje entre el origen i y el destino j, y

D_{ij} : distancia del viaje entre el origen i y el destino j.

En la Ecuación 8 se considera un grado de importancia tanto para las necesidades de viaje como para la distancia entre cada origen-destino, en este caso en particular se fijaron estos pesos en 0.8 y 0.2 respectivamente, dado que se considera que es necesario dar prioridad a los viajes que deben recorrer mayor distancia pero que a la vez su demanda sea lo suficientemente representativa para darle cobertura.

3. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

El resultado de este trabajo fue la matriz origen-destino global de viajes internos realizados en Pumabús, esta información es un insumo para realizar el rediseño de rutas del Pumabús. Las líneas de deseo (Figura 4) que representan las necesidades de viajes internos, muestran que una proporción importante de viajes se realizan a partir de la estación del Metro Universidad. Las principales líneas de deseo se conectan al circuito interior, al circuito exterior junto al circuito deportivo sur y a la zona cultural de CU.

Es claro que este patrón de viajes no se presenta en aquellos que se realizan a partir de los viajes atraídos o generados en Trolebús, en este caso las líneas de deseo de viaje se conectan principalmente a las zonas aledañas al Estadio Olímpico y al Circuito Cultural (la zona norte y la zona sur de CU). Cabe señalar que el número de viajes con estas conexiones es mucho

menor que el de aquellos que conectan con el Metro Universidad.

Las principales líneas de deseo de los viajes atraídos y generados en autobús suburbano se conectan con la parte poniente del Circuito Exterior Sur (parada: estadio de prácticas), la zona cultural y el Circuito de Investigación Científica. Para los viajes atraídos o generados en automóviles, la mayoría de los recorridos internos son cortos.

REFERENCIAS

- GÓMEZ, R. DE LA LL. (1991). *Combinando Estudios Origen-Destino Con Aforos. Estimación de Demanda de Tránsito en Carreteras*. Instituto Mexicano del Transporte, 25, pp. 10-13.
- LOZANO, A., TORRES, V., Y ANTÚN, J. (2003). *Tráfico vehicular*. Ciencias- Universidad Nacional Autónoma de México, 70, pp. 34-45.
- MOLINERO MOLINERO, A., Y SÁNCHEZ ARRELLANO, L. I. (1997). *Transporte Público: Planeación, Diseño, Operación y Administración (2a edición)*. México: Universidad Autónoma del Estado de México.
- ORTIZ C., ESQUIVEL M. Y MERCADO-HERNÁNDEZ (2012). *Índice de Movilidad Peatonal A Escala De Barrio- Modelo SIG Para Evaluar El Potencial de Movilidad Peatonal en Zonas Urbanas*. The XIII International Walking And Liveable Communities Conference Walk 21, México Distrito Federal.
- ORTÚZAR, J. de D. (2000). *Modelos de Demanda de Transporte (2.ª ed.)*. Alfaomega.
- PARRA, A., Y PADILLA, M. (2009). *Encuesta Origen- Destino : Herramienta para determinar la movilidad en el servicio interurbano por ómnibus. Caso: Provincia Holguín*. Transporte, Desarrollo y Medio Ambiente, 29(No 1), pp. 10-14.
- SAATY, T., Y VARGAS, L. (2001). *Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process.-Driven Demand and Operations Management Models*. doi:10.1007/978-1-4614-3597-6.

16 Diagnóstico del tiempo de espera en los módulos del sistema Bicipuma a través de la simulación

Ricardo Torres Mendoza

Esther Segura Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México, México

RESUMEN

En este documento se analiza un sistema de préstamo de bicicletas con condiciones de operación diferentes a los sistemas existentes de este tipo en el mundo, debido a que es un sistema gratuito y no automatizado. La demanda incierta, capacidad de los módulos de atención, procedimiento de préstamo y entrega, velocidad promedio de circulación, entre otras variables, hacen que el enfoque de modelado por optimización no sea el más adecuado, es por eso que dicho análisis se hace mediante el uso de un modelo de simulación el cual refleja la complejidad del sistema, permitiendo hacer un diagnóstico del nivel de servicio mediante el análisis de los tiempos de espera, el número de personas en la línea de espera y los niveles de inventario en las estaciones de servicio.

Palabras clave: diagnóstico, líneas de espera, simulación, sistema Bicipuma.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes de los sistemas de préstamo de bicicletas

En la última década (1995-2015) la movilidad en las zonas urbanas se ha convertido en uno de los principales temas a resolver, ya que ésta impacta directamente el nivel de vida de las personas (tiempos de traslado). El uso de diferentes formas de transporte que van desde el uso del automóvil, pasando por autobuses con carriles dedicados y por último el metro, son en ocasiones insuficientes en ciudades con una gran población. Como una alternativa viable y complemento a estos modos de transporte ha surgido la posibilidad de realizar traslados (regularmente para distancias cortas) mediante el uso de bicicletas, una de las razones es que “las bicicletas son sustancialmente más rápidas que caminar, más flexibles que el transporte público” (Sayarshad et al., 2011) es decir, no se necesita realizar un análisis de frecuencias y horarios para garantizar un adecuado nivel de servicio (entendido éste como la disminución de tiempos de espera e incremento en la disponibilidad del servicio), adicionalmente, el uso de este tipo de sistemas podría contribuir a disminuir la diferencia de los tiempos de traslado entre el transporte público y el automóvil.

Los sistemas de préstamo de bicicletas, tuvieron sus inicios en julio de 1965 en Amsterdam y desde entonces han venido evolucionando, al día de hoy se identifican cuatro generaciones

de este tipo de sistemas (DeMaio 2009), la primer generación se inició en Amsterdam el 28 julio 1965 con las denominadas bicicletas blancas (“witte fietsen”), este sistema consistía en pintar bicicletas de blanco y dejarlas en la calle para uso público, quién encontrara una bicicleta de este tipo podía hacer uso de la misma y dejarla para que alguien más la usará posteriormente, dicho sistema colapsó en algunos días ya que las bicicletas eran abandonadas en canales o simplemente apropiadas para uso privado.

La segunda generación inició en Dinamarca, los primeros lugares en donde se implemento fueron Farso y Grena en 1991, posteriormente en 1993 en Nakskov, es aquí donde se comienza a hacer uso de estaciones para el préstamo y devolución de las bicicletas y finalmente en Copenhague en 1995 se comienza a hacer uso intensivo de bicicletas. El préstamo en esta generación se hace mediante el uso de dinero en efectivo (monedas), sin embargo, se seguía experimentando la pérdida de bicicletas debido a que los usuarios no podían ser identificados.

Las características de la tercera y cuarta generación pueden ser consultadas en la Tabla 1.

Los sistemas de préstamo de bicicletas son concebidos para cumplir con diversos objetivos:

- Mejorar el intercambio entre diferentes modos de transporte (DeMaio 2009, Midgley 2009, Shaheen et al., 2010).
- Reducir la congestión vial (Midgley, 2009 y Shaheen et al., 2010).
- Mejorar la calidad del aire y disminuir los gases de efecto invernadero (DeMaio 2009, Midgley 2009, Shaheen et al., 2010).
- Incrementar el uso de la bicicleta (DeMaio 2009 y Shaheen et al., 2010).
- Mejorar la salud pública (DeMaio 2009, Shaheen et al., 2010).

Tabla 1. Resumen de las generaciones de sistemas de préstamo de bicicletas

| Generación | Año de Inicio | Ciudad/Lugar | Características |
|------------|----------------------|---|--|
| Primera | 1965 | Amsterdam | Servicio gratuito Sin planeación ni reglas operativas |
| Segunda | 1991 1993 1995 | Farso y Grena Nakskov Copenhague | Pago en efectivo Uso de estaciones para préstamo y devolución |
| Tercera | 1996 2000 2005 | Universidad de Portsmouth Munich Lyon | Uso de tarjetas con banda magnética. Estaciones automatizadas Acceso con celular y computadoras |
| Cuarta | 2009 | Montreal | Redistribución de bicicletas. Integración con otros modos de transporte. GPS y bicicletas eléctricas |

Los diferentes tipos de financiamiento o esquemas de proveeduría para los sistemas de préstamo de bicicletas van desde gobierno, agencias de transporte, universidades, compañías de publicidad e iniciativa privada (DeMaio, 2009).

El esquema de operación de la mayor parte de los sistemas de préstamo de bicicletas se describe a continuación:

- Se tienen estaciones distribuidas a lo largo de las ciudades, con sistemas de anclaje automatizado.
- El cliente cuenta con una tarjeta, un código de acceso o una aplicación de teléfono móvil para ingresar al servicio.
- Pueden tomar la bicicleta en una estación y regresarla en cualquier otra estación de la red.
- Operan 24 horas al día, 7 días de la semana.
- Se cobra una cuota anual por el servicio de préstamo.
- Los cargos por renta están basados en el tiempo de préstamo y en la mayoría de los sistemas, la primera media hora de servicio está libre de cargos.

Los problemas que se presentan en los sistemas de préstamo de bicicletas pueden ser clasificados en función del horizonte de planeación en:

- Problemas estratégicos: la solución de dichos problemas tendrá un impacto en el sistema durante tres años o más, el más común de estos problemas se refiere a la localización y dimensionamiento de las estaciones en las que se presta el servicio.
- Problemas operativos: se refiere a aquellos cuyo impacto en el sistema se refleja en unos días y el efecto perdura hasta algunas semanas, algunos ejemplos pueden ser el tamaño de la flota de bicicletas, la cantidad de bicicletas que deben permanecer en cada una de las estaciones, el reabastecimiento de las estaciones, entre algunos otros.

1.2 Revisión de la literatura

En los últimos cinco años se han abordado los diferentes problemas que los sistemas de préstamo de bicicletas presentan, esto tiene congruencia ya que en este lapso ha habido un incremento sustancial en el número de sistemas de préstamo de bicicletas a nivel mundial.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de algunos de los problemas abordados en la literatura, así como las herramientas utilizadas para darles solución.

La literatura revisada en su mayoría hace énfasis en las condiciones de incertidumbre de la demanda, y como el desequilibrio de la demanda entre estaciones tiene como consecuencia que las estaciones no tengan bicicletas disponibles para el préstamo o por el contrario, tengan todos los espacios llenos de bicicletas y no pueda regresarse la bicicleta en la estación. Estas condiciones obligan al rebalanceo del inventario entre las estaciones, para garantizar un nivel de servicio a los usuarios. Los trabajos en su mayoría son complementarios y atacan este problema desde diferentes enfoques.

Tabla 2. Resumen de literatura revisada de los sistemas de préstamo de bicicletas

| Tipo de problema | Título del artículo | Autor/Año | Herramienta utilizada |
|--|---|---|---------------------------------------|
| Capacidad y localización | Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of redistribution. | Shu J., Chou Q., Liu C. y Teo , I. 2010 | Análisis de redes estocástico |
| Patrones en la demanda de bicicletas | Understanding Bike-Sharing Systems using Data Mining: Exploring Activity Patterns | Vogel P, Greiser T y Mattfeld D. 2011 | Minería de datos |
| Tamaño de la flota de bicicletas | A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization | Sayarshad H., Tavassoli S. y Zhao F. 2011 | Optimización multiperiódica |
| Gestión del inventario de bicicletas en las estaciones | Optimal Inventory management of a bike-sharing station | Raviv T. y Kolka O. 2012 | Cadenas de Markov y Métodos numéricos |

1.3 Sistema de préstamo de bicicletas- Bicipuma

Diariamente acuden a Ciudad Universitaria (C.U.) aproximadamente 162,810 personas, para realizar diferentes actividades. Esto representa un problema de movilidad importante, así como un reto específico para la creación de infraestructura de transporte: estacionamientos, paradas del transporte interno (PUMABUS), entre otros.

Una de las acciones que las autoridades de la UNAM realizaron desde marzo del año 2005, fue implementar un sistema de transporte alternativo más eficiente para tratar de reducir los contaminantes que generan más de 70 mil vehículos que ingresan diariamente. Dicho programa consiste en el préstamo de bicicletas para el traslado dentro del campus, y fue denominado, Bicipuma.

La implementación del programa alternativo de transporte Bicipuma tiene como finalidad facilitar el desplazamiento de la comunidad universitaria del campus C.U. de una manera eficiente y gratuita para así poder realizar sus diferentes actividades y en sus momentos libres utilizar este modo de forma recreativa. El empleo de la bicicleta fomenta la actividad física y reduce la congestión vehicular y sus efectos nocivos.

El sistema Bicipuma cuenta con doce módulos que se encuentran en servicio y están distribuidos geográficamente en C.U. Las estaciones son: Estadio Olímpico, Filosofía y Letras, Derecho, Medicina, Arquitectura, Ingeniería, Química, Anexo de Ingeniería, Estadio

Tapatío Méndez, Ciencias, Bicicentro Metro C.U. y Ciencias Políticas. Dichos módulos están conectados por medio de una ciclopista con una longitud de 5,980 metros. En la Figura 1 se muestra la localización de dichos módulos dentro de Ciudad Universitaria.

El préstamo de bicicleta es gratuito y personal, se realiza con la presentación de la credencial de la UNAM actualizada y con código de barras legible, dicho préstamo también se puede realizar a personas externas a la UNAM que realizan actividades deportivas y culturales dentro de sus instalaciones, a través de la huella digital. El tiempo de préstamo (tiempo máximo de traslado del origen al destino) por persona es de 20 minutos.

La forma en que operan los módulos es: el usuario se identifica (con una credencial y más recientemente con huella digital), y automáticamente se procede al préstamo de una bicicleta. La bicicleta se puede dejar en cualquiera de los 12 módulos, esto la convierte en un modo de transporte público más, que se puede utilizar para ir desde una parada (módulo) a cualquier otra parte de ciudad universitaria, sin necesidad de volver al punto original.

El servicio de préstamo es de lunes a viernes de las 6:30 a las 16:00 horas, sin embargo, en caso de presentarse lluvias se cancela dicho servicio para seguridad de los usuarios. La demanda del servicio Bicipuma oscila entre 3,500 y 4,500 préstamos diarios.

El sistema sirve como complemento al transporte público convencional (Pumabús), ya que cuando no existe parada o estación de este modo de transporte en el destino final, se puede continuar desde la más cercana, en bicicleta.

Una representación del funcionamiento del sistema Bicipuma se muestra en la Figura 2.



Figura 1. Localización de los módulos que conforman el sistema Bicipuma

Fuente: <http://www.tucomunidad.unam.mx/Bicipuma/images/ciclopista.png>

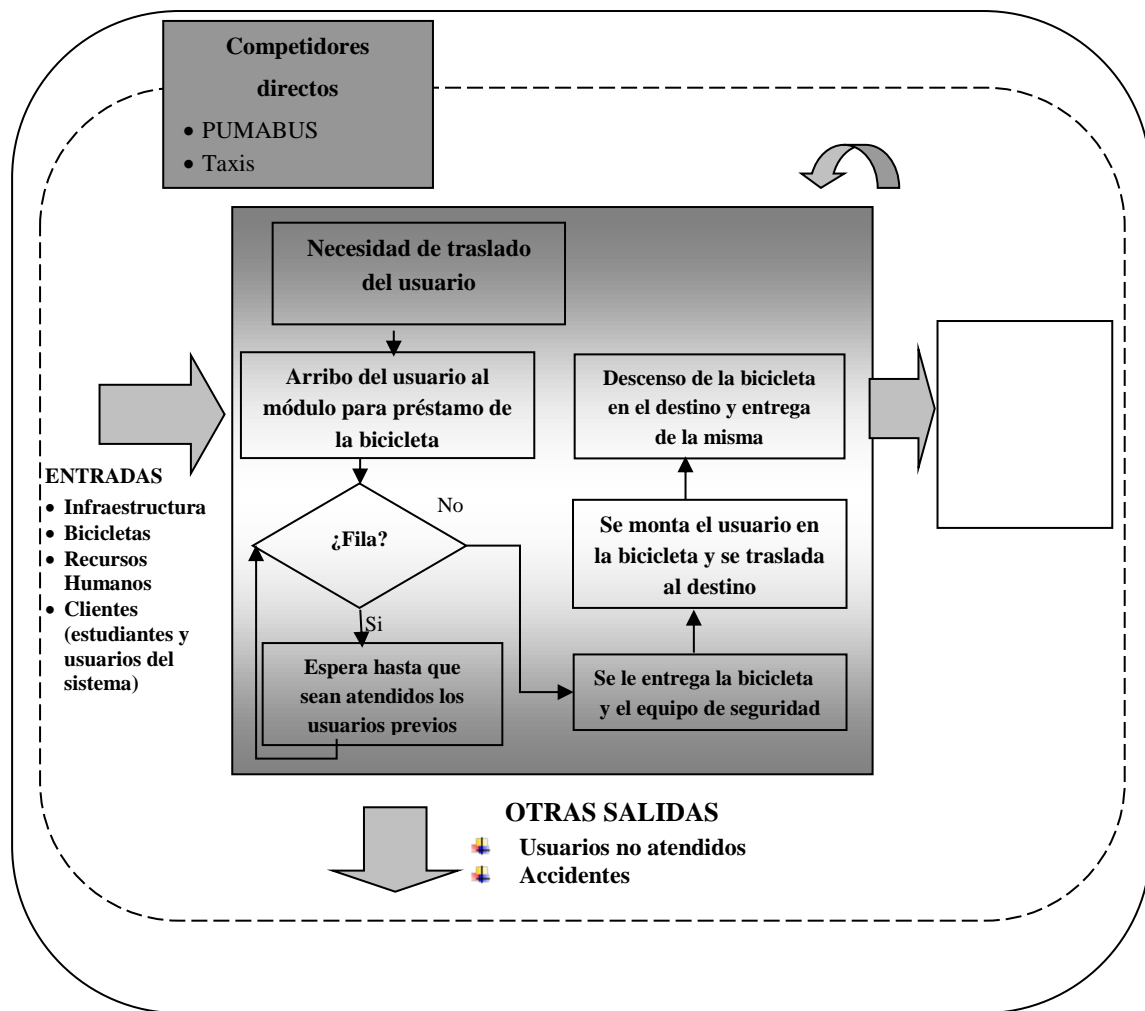


Figura 2. Representación del funcionamiento del sistema Bicipuma

Fuente: Elaboración propia

1.4 Planteamiento del problema

El sistema de préstamo de bicicletas Bicipuma en Ciudad Universitaria, surgió mediante una necesidad de transporte que no era cubierta por las rutas de transporte escolar, los taxis e incluso el traslado a pie.

Sin embargo, el crecimiento de la red de módulos se hizo sin estudios especializados que garantizaran un nivel de servicio a los usuarios de dicho sistema, por lo que la demanda actual de traslado mediante el sistema Bicipuma ha superado la capacidad instalada de algunos de sus módulos. Estos desequilibrios tienen como consecuencia que en determinado horario existan módulos con exceso de bicicletas, mientras que en otros los usuarios esperan por falta de las mismas. Es decir, la problemática se resume en los siguientes puntos:

- 1 Actualmente se presentan tiempos de espera debido a la falta de bicicletas.
- 2 Existe un dimensionamiento erróneo de los módulos, producto de la incertidumbre en la demanda por el servicio.

1.5 Objetivo

Diagnosticar la situación actual respecto a los tiempos de espera del sistema Bicipuma mediante un modelo de simulación que sirva como base para plantear alternativas de solución a la problemática detectada.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Simulación de sistemas en el diagnóstico del sistema Bicipuma

La simulación es una herramienta que permite evaluar el desempeño de un sistema mediante el desarrollo de un modelo apoyado por el uso de paquetes de cómputo (Figura 3). La evaluación tiene como resultado un diagnóstico, si hay un funcionamiento deficiente del sistema, se generan alternativas de solución que corrigen el o los problemas que afectan el funcionamiento de éste.

Mediante el uso de la teoría de la probabilidad y métodos estadísticos, la simulación imita el comportamiento de los sistemas dinámicos, con la ventaja de experimentar con los modelos mediante la modificación de los valores de las variables que en el sistema real no pueden ser cambiadas (variables de decisión) y cuya repercusión en las medidas de desempeño (variables de respuesta) seleccionadas puede observarse tanto visualmente como con estadísticas; de esta forma muchos de los errores que regularmente se encuentran en el arranque de un nuevo sistema o en la modificación de un sistema existente pueden ser evitados. Esta interacción entre el modelador y el modelo de simulación permite que el primero tenga una mayor comprensión de la forma de operar del sistema real, contribuyendo a la generación de alternativas de solución.

Experimentar en un modelo de simulación reduce tiempo y costos, además de evitar una intervención en el sistema modelado. Permite que las diferentes áreas y disciplinas que intervienen en el sistema analicen las repercusiones de sus decisiones y su impacto en el desempeño global.

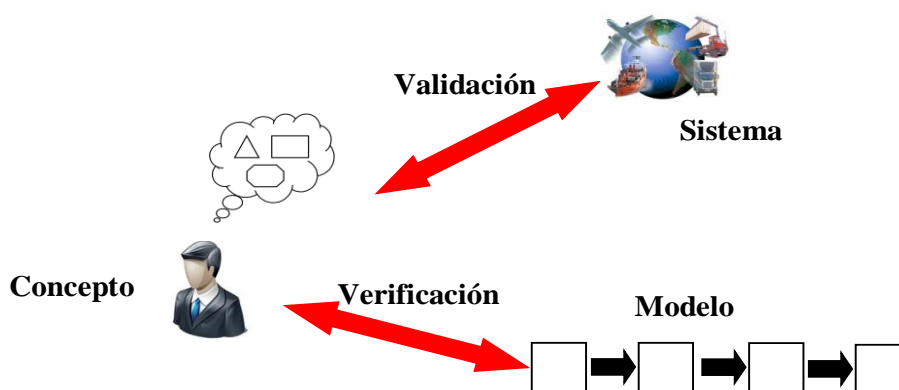


Figura 3. Modelado de sistemas

Fuente: Harrell et al., 2004

Sin embargo, hay que tomar en cuenta que el uso de la simulación está generalmente asociado al estudio de sistemas complejos, entendiendo como sistema complejo aquél que está compuesto por una gran cantidad de elementos que pueden tener diferentes comportamientos y cuya interdependencia es muy alta, es decir, el comportamiento de uno de ellos puede afectar al resto de los elementos. Algunos ejemplos de sistemas complejos serían los aeropuertos, hospitales y fábricas. En este documento se presenta la aplicación de la simulación en un sistema de préstamo de bicicletas.

Un sistema de préstamo de bicicletas puede considerarse complejo, debido a las siguientes variables, las cuales están altamente interrelacionadas entre sí:

- Demanda incierta para el traslado entre estaciones, de hecho dentro del sistema de préstamo de bicicletas se tiene incluido un sistema de líneas de espera, el cual tiene como una de sus variables la tasa promedio de arribos de los clientes (λ), ya sea que van a recoger o dejar una bicicleta.
- Tasa promedio de servicio (μ) para cada una de las estaciones, dicha tasa es más homogénea cuando hablamos de un servicio automatizado.
- Velocidad de traslado de cada uno de los usuarios.
- Distancia entre cada una de las estaciones que conforman la red del sistema de préstamo de bicicletas.
- Número inicial de bicicletas disponibles al inicio del día en cada una de las estaciones.
- Capacidad instalada para almacenar bicicletas de cada una de las estaciones.

Mediante el uso de un modelo de simulación podrán visualizarse los desequilibrios que actualmente se dan en el transcurso del día en los diferentes módulos del sistema Bicipuma.

2.2 Metodología de la investigación

Para la realización de esta investigación se siguieron las siguientes etapas: planeación del proyecto, colección y levantamiento de los datos, validación de datos, transformación de los datos en información, diseño del mapa característico de las localizaciones de los módulos del sistema Bicipuma, diseño del modelo base para la simulación de las operaciones de los módulos del sistema Bicipuma, simulación y validación del modelo y análisis de resultados.

2.2.1 Planeación del proyecto

En esta etapa se realizó la definición de los objetivos, el alcance y los requerimientos del proyecto para realizar la simulación del sistema Bicipuma.

El objetivo fue analizar el desempeño de dicho sistema desde una perspectiva holística, que considerara la mayor parte de las variables de decisión involucradas con la operación de dicho sistema que afectarán directamente la variable de desempeño (tiempo de espera), que se tomó como parámetro para la toma de decisiones. Es decir, el alcance de dicho modelo involucra simular la interacción de las doce estaciones, considerando la tasa de arribos para

solicitud de préstamo en cada uno de los módulos, la tasa de servicio de cada uno de éstos, la distancia que hay entre cada uno de los módulos, el inventario con el que inician operación y la velocidad de traslado de los usuarios.

Los requerimientos fueron proyectados, se fueron ajustando sobre la marcha del estudio y consistieron de:

- Personal que observara y analizara la operación, así como la recolección de datos.
- Acceso a las instalaciones del sistema Bicipuma.
- Acceso a programas de cómputo para análisis estadístico.
- Acceso a programas de cómputo para simulación de eventos discretos.

2.2.2 Recolección y levantamiento de los datos

En esta etapa se obtuvieron los datos requeridos para la realización del modelo de simulación del sistema Bicipuma, dichos datos se clasifican según Harrell et al., 2004, en datos estructurales, operativos y numéricos.

Los datos estructurales involucran todos los objetos en el sistema a modelarse, en este caso se trata de las 12 estaciones o módulos del sistema Bicipuma, los usuarios del sistema, las bicicletas, los trabajadores que operan en cada una de las estaciones.

Los datos operativos explican cómo funciona el sistema, es decir, cuándo, dónde y cómo tienen lugar los eventos y actividades. Esto puede visualizarse en la Figura 2 en la parte central, un usuario tiene una necesidad de traslado, llega al módulo o estación, si no hay usuarios que hayan arribado antes que él (línea de espera o fila) comienza a ser atendido, se le entrega la bicicleta y el casco, realiza el traslado a través de una red de caminos especialmente diseñado para facilitararlo, llega a su destino desciende de la bicicleta y si no hay línea de espera, entrega tanto bicicleta como casco. En el sistema Bicipuma se forma una sola línea de espera en cada una de las estaciones o módulos tanto para préstamo como para entrega.

El diseño de este modelo requiere la obtención de los métodos de préstamo y de devolución a través de cursogramas analíticos para cada una de las estaciones, en la Figura 4 se observa uno de los cursogramas analíticos resultado de este estudio.

En la Figura 4 se aprecia que la primera actividad que se realiza es la llegada del usuario al módulo o estación, esto se representa con una flecha horizontal hacia la derecha señalando una actividad de transporte, posteriormente mediante un escáner de código de barras se realizan dos operaciones que son representadas con un círculo, estas operaciones son el escaneo de la credencial del usuario y posteriormente el escaneo del código de barras de la bicicleta, finalmente la última actividad es un almacenamiento que se representa mediante un triángulo invertido, esta actividad consiste en recoger o devolver tanto la bicicleta como el casco.

Los datos numéricos proporcionan información cuantitativa sobre el sistema, en este caso los datos numéricos que tuvieron que ser recolectados fueron:

- Inventario con el que iniciaban su operación cada uno de los módulos. Este dato varía cada día de operación y se tomó un promedio.
- Tiempo que tardan cada una de las actividades realizadas en el préstamo y devolución de bicicletas por módulo. Para esto se realizó una toma de tiempos en cada uno de los módulos, el tamaño de la muestra osciló entre 34 y 80 en función del nivel de actividad del módulo o estación.
- Distancia entre cada una de las estaciones o módulos.
- Velocidad promedio de las bicicletas.
- Tiempo entre arribos para cada una de las estaciones. Esta información fue proporcionada por los administradores del sistema Bicipuma, dada que el préstamo está sistematizado, se tiene el total de la información requerida. En la Figura 5 se observa un ejemplo de cómo se proporcionó dicha información, la cual consiste en número de bicicleta, fecha del préstamo, hora de salida, módulo de préstamo, hora de entrega y módulo de entrega.

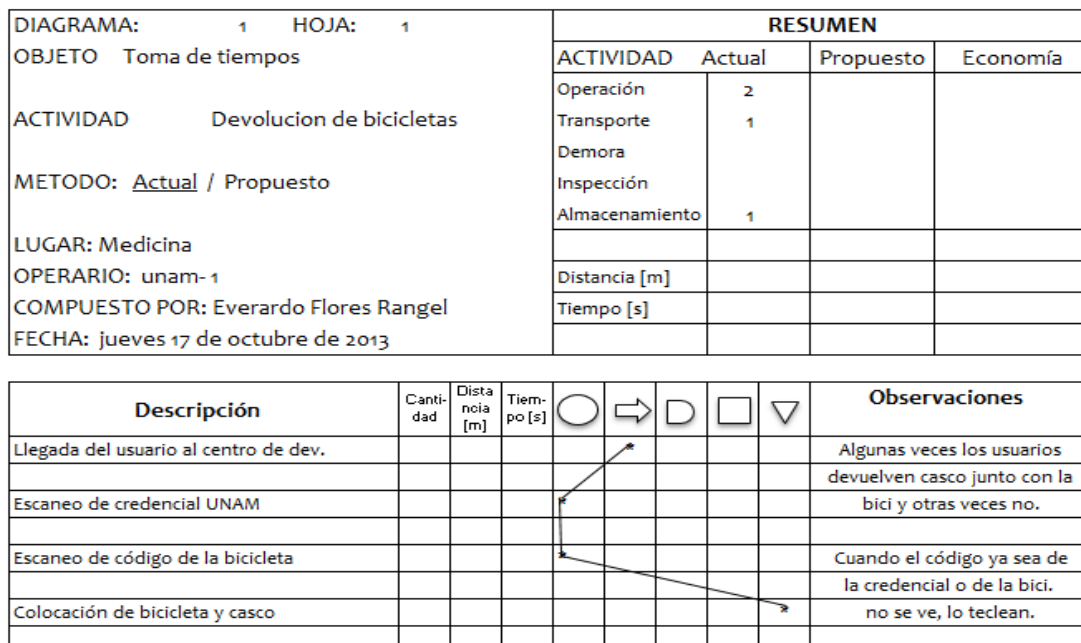


Figura 4. Ejemplo de cursograma analítico para la devolución de bicicletas

Fuente: Elaboración propia

| | bicicleta | fecha | hora salida | Módulo Préstamo | hora entrega | Módulo Destino |
|---|-----------|------------|-------------|------------------------|--------------|----------------|
| 3 | | | | | | |
| 4 | 1680 | 2013-10-09 | 06:36:07 | ESTADIO TAPATIO MENDEZ | 06:47:25 | QUIMICA |
| 5 | 2098 | 2013-10-09 | 06:47:07 | ESTADIO TAPATIO MENDEZ | 06:51:51 | QUIMICA |
| 6 | 1528 | 2013-10-09 | 06:49:09 | BICICENTRO METRO C.U. | 06:51:25 | CIENCIAS |
| 7 | 1975 | 2013-10-09 | 06:50:11 | ESTADIO TAPATIO MENDEZ | 06:56:30 | QUIMICA |

Figura 5. Préstamos y devoluciones sistema Bicipuma

Fuente: Bicipuma

2.2.3 Validación de datos

Uno de los factores más importantes en la simulación es contar con la información completa (confiable y suficiente) para que el modelo refleje el comportamiento del sistema real que busca analizarse. Es por eso que existe un proceso de validación que se hace de manera paralela conforme se realiza el modelo de simulación, si bien en la etapa de recolección de datos debería garantizarse contar con los datos suficientes, esto se completa en ocasiones, hasta la etapa de validación del modelo.

2.2.4 Transformación de los datos en información

Este proceso consistió en analizar los datos disponibles para la formulación y creación del modelo del sistema Bicipuma, esto es analizar los datos y transformarlos de forma que sirvan para alimentar el modelo de simulación.

Una vez que se tienen los datos se les aplican pruebas de independencia, es decir se verifica que el valor de una observación no este influido por el valor de otra observación (Harrell et al., 2004). Se realizaron tres pruebas de independencia para cada conjunto de datos, gráfica de dispersión, gráfica de autocorrelación y prueba de rachas. Ver Figura 6.

Los datos numéricos de la muestra acerca del tiempo para préstamo y devolución son considerados en el modelo de simulación mediante la selección de una distribución teórica que mejor se ajuste a los datos. Para esto, los datos se ajustan mediante las pruebas de bondad de ajuste Chi- Cuadrada, Kolmogorov-Smirnov y Anderson Darling.

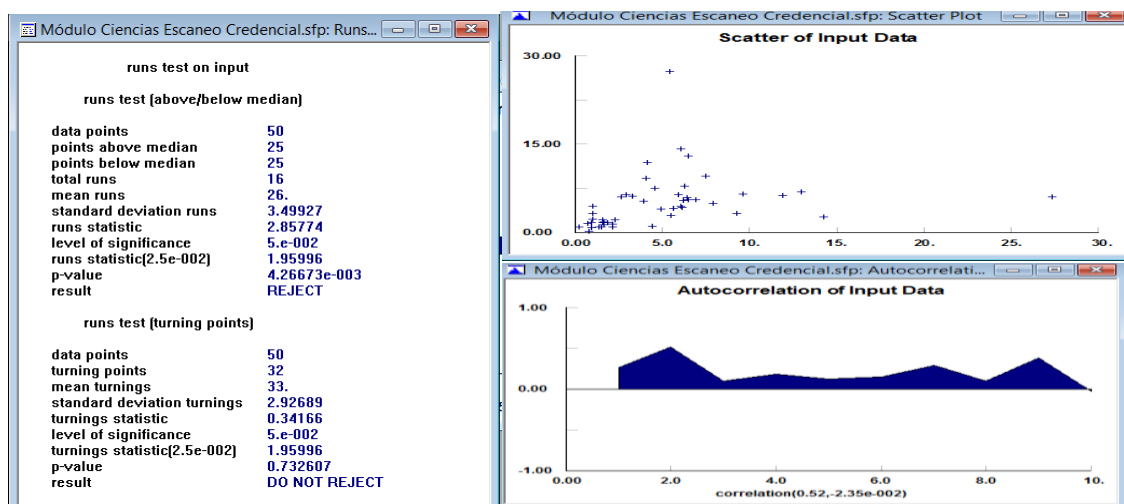


Figura 6. Pruebas de independencia de los datos numéricos para el modelo de simulación del sistema Bicipuma

Fuente: Elaboración propia

2.2.5 Diseño del mapa característico de las localizaciones de los módulos del sistema Bicipuma, C.U.

Se representó el sistema Bicipuma mediante un mapa en el que se visualiza cada uno de los módulos que lo conforman, distancias entre cada uno de ellos y las rutas que los unen.

2.2.6 Diseño de modelos base para la simulación de las operaciones los módulos del sistema Bicipuma

En esta etapa del proyecto se realizan de manera detallada las relaciones e interacciones de los componentes del sistema y sus variables correspondientes. La Figura 7 muestra una imagen del modelo.

2.2.7 Simulación y validación del modelo

La simulación del sistema de préstamo de bicicletas se realizó mediante el uso del programa Promodel®, cuya selección se debe a la facilidad que brinda de cargar diferentes elementos de modelado mediante el uso de hojas de cálculo, además se disponía de una licencia.

En esta etapa se ejecutó el modelo para obtener el número de bicicletas existentes en cada módulo a lo largo de la jornada, es decir, se emplearon como herramientas de validación, los conteos realizados en cada uno de los módulos, mismos que muestran el número de bicicletas para cada uno de los conteos realizados. A partir del modelo de simulación se obtuvieron las gráficas que relacionan el número de bicicletas conforme al tiempo, para cada módulo. Dichas gráficas se compararon con los conteos mencionados anteriormente.

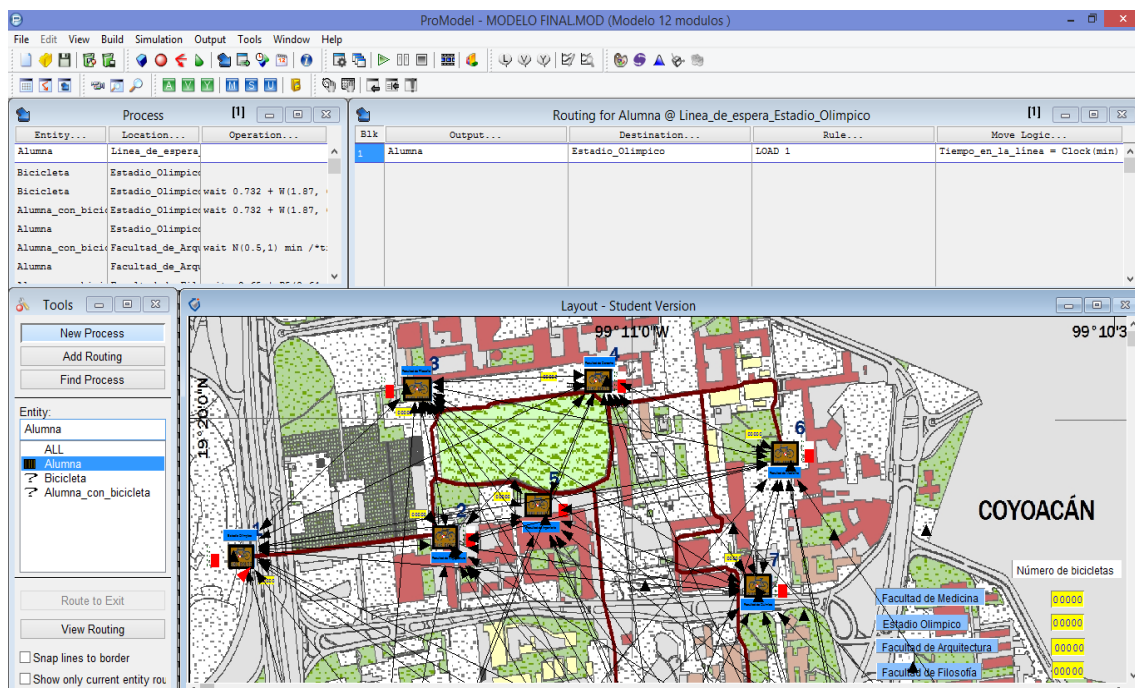


Figura 7. Captura de pantalla del modelo de simulación del sistema Bicipuma Fuente: Elaboración propia

El modelo de simulación arroja el número de bicicletas en cada módulo a lo largo del día, las diferencias entre lo que arrojó el modelo y los conteos fueron de entre 20 y 25% en el horario de 6:30 a 13:00 horas; para el horario de 13:00 a 16:30 horas, los resultados fueron diferentes debido a un rebalanceo que actualmente se hace entre los módulos del sistema Bicipuma.

Al concluir esta etapa, el modelo de simulación estaba estructuralmente listo para realizar cualquier número de corridas de simulación para probar diferentes escenarios. Los resultados que arrojen los modelos corresponderán a la disponibilidad de información suficiente para crear aproximaciones a la realidad de los comportamientos que se buscan simular.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo de simulación propuesto tiene como resultado una gran cantidad de indicadores, sin embargo, se presentan tres de ellos: la cantidad de tiempo promedio en espera por parte del usuario, el número máximo de personas en la línea de espera y el inventario disponible en el módulo.

Después de realizar la simulación de la operación del día 09 octubre 2013, en la Figura 8 se puede observar que, para la línea de espera del módulo de la Facultad de Ingeniería, ingresaron un total de 207 usuarios con un tiempo promedio de espera de 0.97 minutos y un máximo de 7 personas en la línea de espera. En la Figura 9 se muestra una gráfica en la que se muestra el contenido de bicicletas en el módulo de la Facultad de Ingeniería (color café) y la cantidad de usuarios en la línea de espera (color azul), esta gráfica demuestra algo que de manera intuitiva se conocía, las líneas de espera se forman a medida que el inventario disminuye. En la Figura 10 se observa que el contenido de bicicletas en algunos módulos es grande, mientras que en otros es baja, esto se debe a la demanda de cada módulo.

| Name | Scheduled Time (HR) | Capacity | Total Entries | Avg Time Per Entry (MIN) | Avg Contents | Maximum Contents | Current Contents | % Utilization |
|------------------------------------|---------------------|-----------|---------------|--------------------------|--------------|------------------|------------------|---------------|
| Línea de espera Estadio Olímpico | 10.48 | 999999.00 | 65.00 | 0.11 | 0.01 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Arquitectura | 10.48 | 999999.00 | 109.00 | 0.26 | 0.04 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Filosofía | 10.48 | 999999.00 | 213.00 | 0.31 | 0.11 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Derecho | 10.48 | 999999.00 | 156.00 | 0.10 | 0.02 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Ingeniería | 10.48 | 999999.00 | 207.00 | 0.97 | 0.32 | 7.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Medicina | 10.48 | 999999.00 | 405.00 | 0.03 | 0.05 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Química | 10.48 | 999999.00 | 152.00 | 3.43 | 0.83 | 9.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Anexo | 10.48 | 999999.00 | 480.00 | 0.03 | 0.06 | 5.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Tapatío Méndez | 10.48 | 999999.00 | 137.00 | 0.03 | 0.02 | 4.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Ciencias | 10.48 | 999999.00 | 263.00 | 1.08 | 0.45 | 10.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Ciencias Políticas | 10.48 | 999999.00 | 60.00 | 1.04 | 0.10 | 3.00 | 0.00 | 0.00 |
| Línea de espera Bicicentro | 10.48 | 999999.00 | 541.00 | 6.10 | 5.24 | 33.00 | 0.00 | 0.00 |

Figura 8. Tiempo promedio de espera y contenido máximo en las líneas de espera operación del sistema Bicipuma 09 octubre 2013

Fuente: Elaboración propia

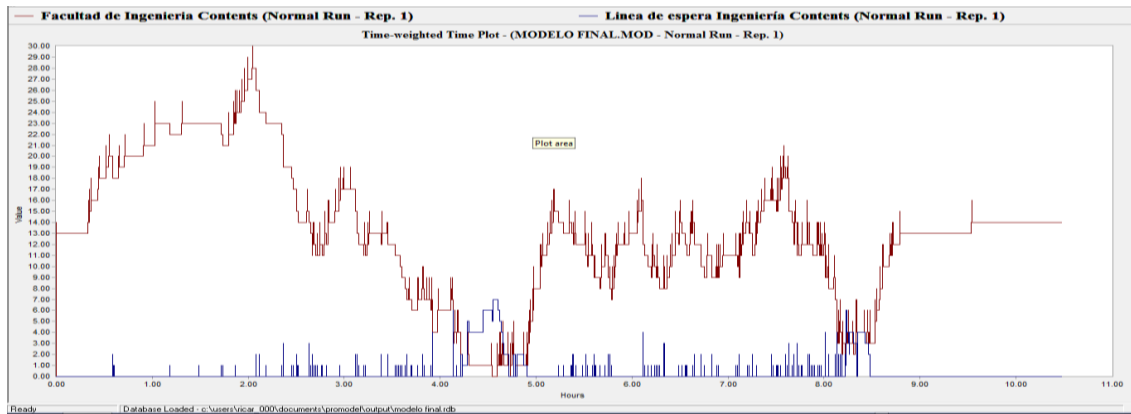


Figura 9. Contenido de bicicletas y cantidad de usuarios para el módulo Facultad de Ingeniería del sistema Bicipuma, jueves 09 octubre 2013

Fuente: Elaboración propia

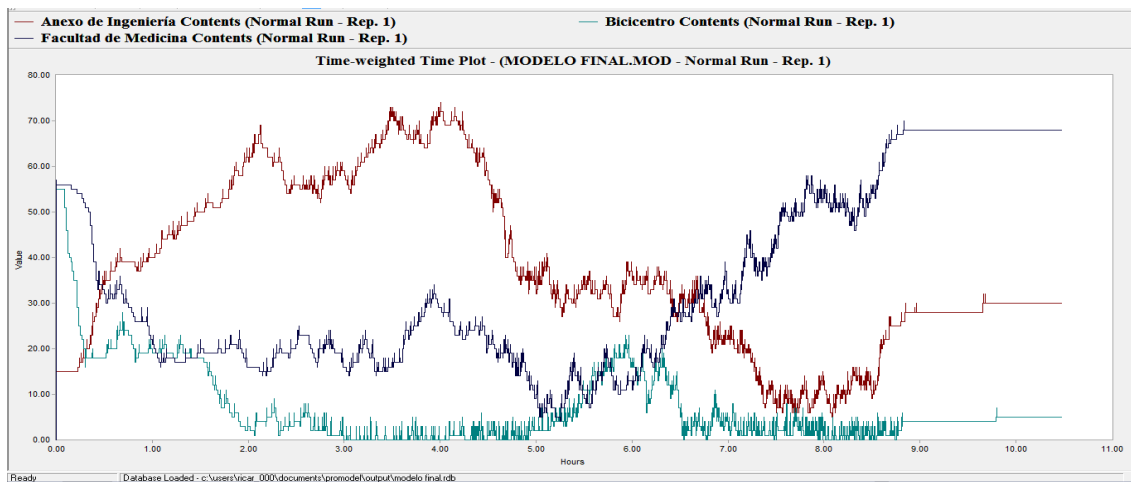


Figura 10. Contenido de bicicletas módulos Anexo de Ingeniería, Bicicentro y Facultad de Medicina del sistema Bicipuma jueves 09 octubre 2013

Fuente: Elaboración propia.

4. CONCLUSIONES

El modelo de simulación planteado contempla la mayor parte de las variables consideradas en la literatura (tasas de arribo y de servicio para préstamo y devolución, distancia, velocidad de traslado, tiempo de espera, tamaño de la línea de espera, inventario de bicicletas en el módulo), asimismo el modelo relaciona dichas variables de forma tal que captura la complejidad del sistema Bicipuma.

El resultado de la simulación nos permite observar la relación existente entre el nivel de inventario en los módulos del Bicipuma y el tamaño de la línea de espera.

El modelo de simulación permite ver que las demandas de los módulos son complementarias, es decir, mientras en un módulo hay un exceso de inventario, dicho inventario es requerido en algún otro módulo para satisfacer la demanda, esto podría permitir un rebalanceo del

inventario entre módulos, de tal forma que el tamaño de la flota total sería menor, lo que nos permitiría ahorros.

Actualmente, la administración del sistema Bicipuma ejecuta rebalancesos entre los diferentes módulos, esto permite que el servicio sea constante; sin embargo, resultado del análisis general del sistema mediante observación directa y el uso del modelo de simulación, se proponen las siguientes alternativas de solución:

- a) Determinación del inventario de seguridad, punto de reorden y nivel de inventario a alcanzar para cada uno de los módulos, evitando el desabasto.
- b) Reestructuración del sistema del Bicipuma para que opere con puntos de reorden para emitir ordenes de abastecimiento.
- c) Localización de los transportes para reabastecimiento del sistema Bicipuma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo para la realización de este proyecto (2013-2014) a la Dirección General de la Comunidad Universitaria, al Director General Alejandro Fernández Varela Jiménez y al Coordinador del Programa Bicipuma Rubén Vázquez Palma, así como a los estudiantes que participaron en la colección de los datos y realización del modelo como parte de su formación y titulación en las asignaturas de la Facultad de Ingeniería.

REFERENCIAS

- DEMAIO, P. (2009). *Bike-sharing: History, Impacts, Models of Provision, and Future*. Journal of Public Transportation by USF, 12(4), 41-56.
- HARREL, C., GOSHBIMAN K. Y BOWDEN R. (2004) *Simulation Using ProModel*, 2nd. Edition, Mc Graw Hill, New York. pp. 125-169.
- MIDGLEY, P. (2009). *The role of Smart Bike-sharing Systems in Urban Mobility*. Journeys Sharing Urban Transport Solutions, (2), 23-31.
- RAVIV, T., Y KOLKA, O. (2012). *Optimal inventory management of a bike-sharing station*. IIE Transactions, 1077-1093.
- SAYARSHAD, H., TAVASSOLI, S., Y ZHAO, F. (2011). *A multi-periodic optimization formulation for bike planning and bike utilization*. Applied Mathematical Modelling, 36(10), 4944-4951.
- SHAHEEN, S., GUZMAN, S. & ZHANG, H. (2010). *Bike sharing in Europe. the Americas. and Asia: Past, Present and Future*. Transportation Research Record.
- SHU, J.M., CHOU, Q., LIU, C-P. and TEO, I-L. (2010). *Bicycle-sharing system: deployment, utilization and the value of redistribution*. Working paper, National University of Singapore – NUS Business School.
- VOGEL P., GREISER T., Y MATTFELD D. (2011). *Understanding Bike-Sharing Systems using Data Mining: Exploring Activity Patterns*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 20, 514-523.

17 Exact model for LTL Location-Routing Problem

André Alarcon de Almeida Prado

Nicolau Dionísio Fares Gualda

Universidade de São Paulo, Brazil

ABSTRACT

In the Less Than Truck Load (LTL) operations both the location of facilities and the routing of vehicles are important decisions for the optimal design of the related logistics network. Two interdependent problems arise: the Location Allocation Problem (LAP) and the Vehicle Routing Problem (VRP). This paper presents a mathematical model to solve the LAP and the VRP simultaneously on an integrated way, such as the so-called Location-Routing Problem (LRP). According to Akca et al., (2009), Prodhon and Prins (2014), the LRP integrated approach provides better results than considering the LAP and the VRP separately. The model was applied to a real case, respecting the constraints and the required service level standard, providing good results for the company where it was tested. The model results were better than the results presented by a market-leading software.

Key Words: Location-Routing Problem, LTL, network design, logistics.

1. INTRODUCTION

Less Than Truck Load (LTL) operation has become an important alternative for manufacturing, trading and services companies to reach their customers, especially in a country like Brazil, due to the size of the country and the population dispersion which lead to a complex transport operation and to relevant logistics costs.

By consolidating loads originating from various shippers related to these companies, logistics service providers and collaborative shippers seek to structure their transport systems in an effective and efficient way.

A transport system performs an important role in logistics through the movement of goods and its related services, as freight management, cargo storage and value-added services. The relationships of these activities in the logistic chain should ensure the expected level of service and always look for the reduction of costs and lead-times.

The performance of a transport system has a prime importance in the logistics results, as well as the location of distribution centers and the way products are distributed (Guerra et al., 2007). Therefore, the determination of where to locate the terminals and how these terminals distribute goods to recipients are important decisions that arise in the design of

logistics networks and have been taken independently in the most cases. This paper proposes an integrated solution of the two problems that support these decisions: the Location Allocation Problem (LAP) and the Vehicle Routing Problem (VRP).

The Location Allocation Problem searches for the optimal number and location of installations to supply the demand of the destinations and to minimize the transport costs of these terminals to the destinations. This problem occurs in many practical cases where warehouses, distribution centers and manufacturers provide services to third parties (Azarmand and Jami, 2009).

A particular case of LAP, the Hub-and-Spoke Location Problem, is one of the LTL issues. It consists of determining the number of consolidation terminals (hubs), their location, and the allocation of recipients (spokes) to these terminals to minimize the total cost, which consists of fixed and variable costs (Cunha e Silva, 2007). The Hub-and-Spoke Location Problem can be suited for optimizing LTL operations, as noted by the same authors.

Another LTL issue is the VRP, i.e., to find a group of delivery routes for the vehicles of one facility, ensuring that all the spokes are visited and the total costs of the routes are minimized (Pillac et al. 2013).

Figure 1 shows the network configuration resulting from the application of a model for strategic review of a LTL operation involving three consolidation terminals. The LTL transport network, in these cases, usually deals with large shippers (shippers that have daily dispatches) and with fleets of vehicles adequate for the required operations. These operations are commonly of the B2B (business to business) type, with loads destined to distributors, wholesalers or other companies. For this shipment profile, usually the collect vehicles are dedicated ones and the delivery vehicles are related to some or many destinations, that is, there is a shipping consolidation to be delivered to multiple destinations through delivery routes as shown in Figure 2.

The results expected with this implementation are the following:

- the number of terminals for cargo consolidation (hubs);
- the location of these hubs;
- the vehicles delivery and transfer routes from each terminal;
- the shippers and destinations (spokes) allocation to each terminal.

Figure 3 illustrates the expected results. Figure 4 shows the operational steps of the network revision. Two new hubs (C and E) were opened in the revised network, among which six were evaluated (A, B, C, D, E and F). The proposed network initially had two ties and three levels (Shippers, Terminals and Destinations); the revised network has three ties and four levels (Shippers, Terminals, Hub's and Destinations).

Therefore, this work aims to contribute with a new model for strategic review of a LTL network to achieve more effective and more efficient operations associated to collects, transfers and deliveries of goods, respecting the existing operational constraints and the service level agreements.

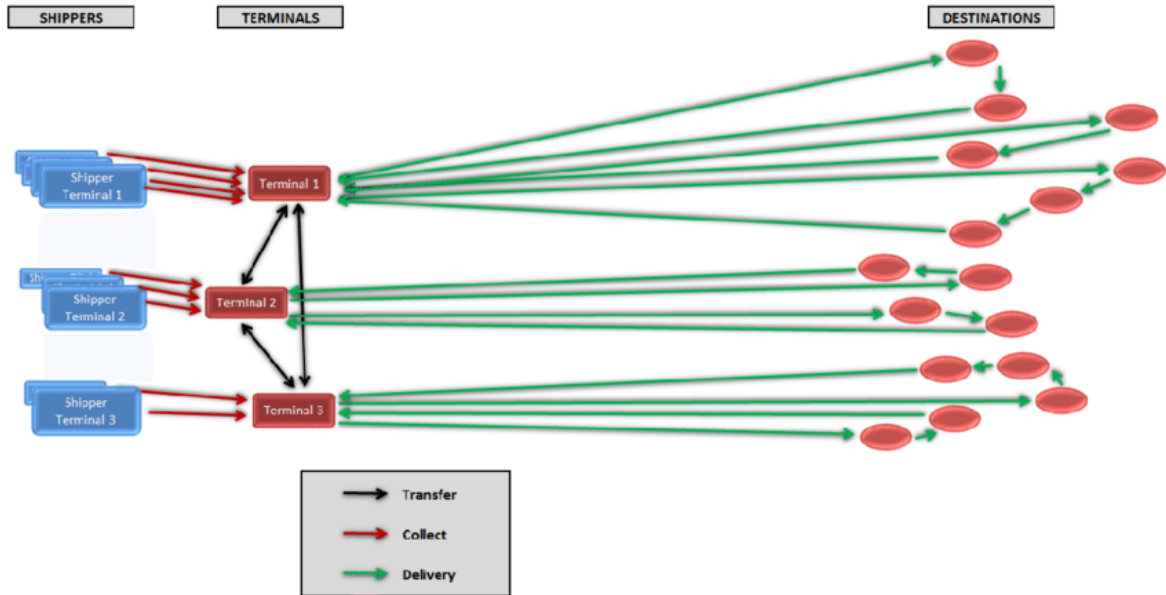


Figure 1. Representation of a LTL network configuration

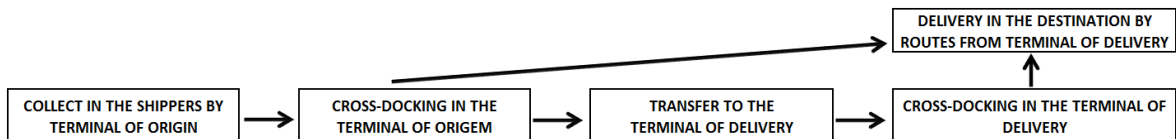


Figure 2. Steps of an operational model applied to a LTL network

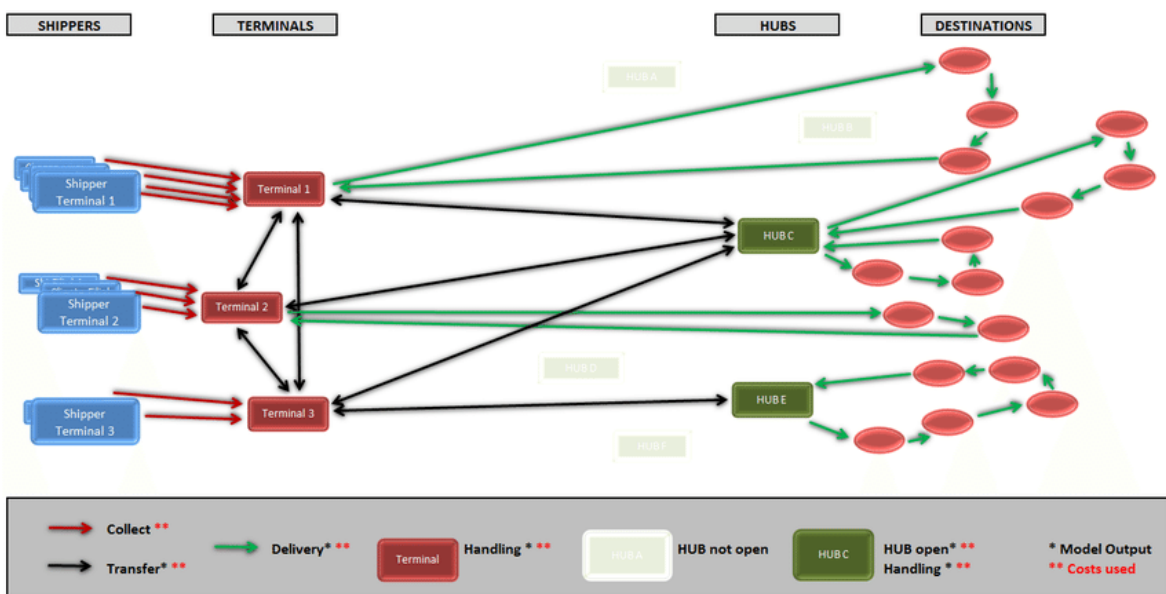


Figure 3. Representation of the LTL network incorporating hubs

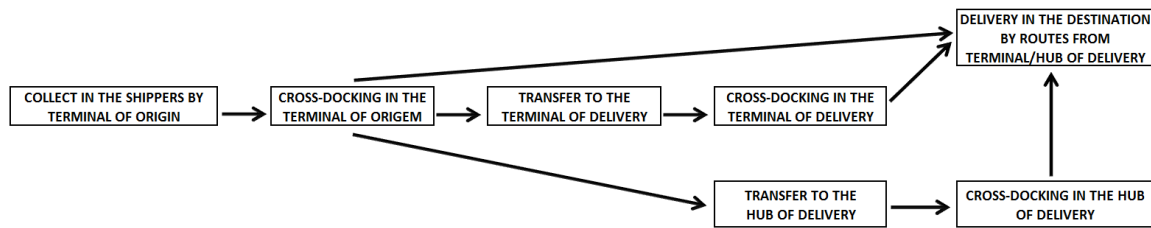


Figure 4. Steps of an operational model applied to a LTL network with hubs

2. LITERATURE REVIEW

The literature presents mathematical models and techniques to solve localization, allocation and distribution problems. This theme has also attracted interest given the increase of complexity of the models due to the restrictions imposed by the real systems.

In corporate logistics LAP and VRP decisions are clearly interdependent. However, most of the time, they have been treated separately, which should not contribute to reduce the related total cost, and probably will increase the related total cost; vehicle routing associated to already fixed locations normally leads to a quality of the solution lower than the optimal one (Wan and Zhang, 2008).

2.1 Location Routing Problem

Location Routing Problem (LRP) is a logistics network design approach that treats two complex issues: optimizing the location of terminals and optimizing the routing of delivery vehicles leaving these terminals. The continued progress in optimization techniques enabled the development of integrated approaches to address the two problems at the same time (Prodhon and Prins, 2014).

When the results are compared with those obtained from other procedures commonly used, it is clear that this approach can in most cases result in more consistent solutions (Guerra et al., 2007). Thus, the importance of the integrated solution of LAP and VRP problems with a LRP approach seems clear.

2.2 Methods and Solutions

Guerra et al., (2007) suggested that the methods to produce LRP solutions should be classified according with the correlation between LAP and VRP problems, as described by Min (1989). The main existing LRP methods can be classified according to Nagy and Salhi (2007) as:

- Exact Methods: LRP models based on mathematical programming.
- Sequential Methods: The location problem is solved from the beginning, minimizing the distances between facilities and destinations; then the routing problem is solved.

- **Solution Methods for Clusters:** Initially, destinations are divided in groups and for each cluster one installation is defined. Then, the VRP is solved for each one.
- **Iterative Heuristic:** The problem is divided into two sub-problems, LAP and VRP, which are solved iteratively.
- **Hierarchical Heuristics:** the location is considered as the main problem and the routing as a secondary problem.

2.3 Classification of the applications in the literature

Based on the literature surveys by Nagy and Salhi (2007) and Drexl and Schneider (2013), the LRP applications can be classified in terms of:

- **Hierarchical structure:** terminals provide service to a number of sources and/or destinations that are connected to the terminals through vehicle routes.
- **Input data type:** Input data can be deterministic or stochastic; most of the applications in the literature use deterministic data; stochastic data appears related to only one variable.
- **Planning Period:** can be related to single or to multi periods. Problems with single or multiple periods are known respectively as static or dynamic. The vast majority of applications are of the static type.
- **Solution Method:** The methods of resolution may be exact or heuristic. There are more applications using heuristic methods. However, some exact methods have produced excellent results for some LRP cases.
- **Objective Function:** The usual LRP goal is the minimization of costs; costs are divided into terminal costs and distribution costs. There are a few number of studies with qualitative measures of service level in monetary terms.
- **Locations of Terminals:** The default LRP considers a discrete number of points as possible candidates for the location of the terminals. The continuous location routing problem (CLRP) allows to allocate the facilities at any continuous points.
- **Number of Echelons:** The default LRP has only one echelon. The "Multi" echelon problems or "N" links (Multi-Echelon or N-Routing Problems) are those in which the destinations are not served directly by a deposit, but by "N" echelons in the logistics network. Transfers between terminals are needed. Articles about LRP with Multi-Echelon have appeared in recent years.
- **Types of Collect and Delivery:** The tasks to be performed in LRP can be to deliver goods to the end customers of one or several potential terminals, to collect goods at defined points and deliver the goods to one of the several potential terminals, or both. In the latter case it is possible that the goods are collected at one point and delivered to another; these problems are called pickup-and-delivery LRPs or LRPPD. It is also possible that a single point has goods both collected and delivered and also that the collect and delivery is made during the same visit. This variation of the problem is called LRP with simultaneous pickup and delivery (LRPSPD). Another type of LRP dealing jointly with collections and deliveries is the Many-to-Many LRP. These

problems involves the location of intermediate terminals (hubs) for cargo consolidation. In this type of LRP necessarily exists transportation between terminals and such transport is generally straightforward.

Besides the above features, LRPs may differ with respect to: direction of the network, capacity of the facilities and capacity and heterogeneity of the fleet. Drexl and Schneider (2013) estimates that these aspects do not alter the nature of the problem and should be considered as variations of the usual problems.

The proposed use of the LRP methodology to replace the LAP and VRP is viable in terms of implementation and with a long history of achieving better results, as described in Tuzun and Burke (1999), Akca et al., (2009), and Prodhon and Prins (2014), among other authors. Most LRP models are applied at a strategic level and few tactical actions are observed. This is probably due to the difficulty to change terminals in the short or in the medium terms.

The review by Nagy and Salhy (2007) excludes LTL problems from LRP, due to the transfers between terminals. However, Drexl and Schneider (2013) show that it is possible to use the LRP approach also in LTL and courier cases. Prodhon and Prins (2014) suggest that another relevant opportunity is to develop a model that correctly describes the structure of the practical problems, what has not yet been explored in the literature.

Several authors cite the co-existence of studies based on exact or heuristic models. Models based on heuristics or metaheuristics can be applied to major instances, but exact models can usually be applied in a simple and understandable way, and can be adaptable to a higher number of variations.

Nagy and Salhi (2007) emphasize the applicability of the exact methods because of the quality of the results. Drexl and Schneider (2013) suggest the best cases for using an exact solution:

“Exact methods exploit that an optimal solution to an LRP can be computed by minimizing, overall subsets of the set of potential facilities, the opening costs of the facilities in a subset and the costs of an optimal solution to a multi-depot VRP where the depots correspond to the facilities in the subset and have the respective capacities”.

Based on the conclusions of Drexl and Schneider (2013) it is possible to conclude that an exact method can be the best solution for solving the type of problem under study. In this context, there is the motivation for the development and application of a model based on Mixed Integer Linear Programming.

Table 1. Multi-Echelon and Many-to-many LRP references

| Study | Year | Capacitated Terminal | Number of echelons | Many-to-Many LPR | Solution | Practical Problem | Size of Application |
|-------------------------|------|----------------------|--------------------|------------------|--|-------------------|---|
| Nagy and Salhi | 1998 | Yes | 1 | Yes | Integer Linear Programming | No | 8 terminals and 249 clients |
| Wasner and Zapfel | 2004 | Yes | 1 | Yes | Integer Linear Programming and Heuristic | No | No Information |
| Ambrosino and Scutellà | 2005 | Yes | 3 | No | Integer Linear Programming | No | 1 plants, DCs, 23 TPs and 135 clients (GAP of 46,92%) |
| Lee et al. | 2010 | Yes | 3 | No | Integer Linear Programming and Heuristic | Yes | 30 shippers, 10 plants, 10 terminals and 30 clients |
| Çetiner et al. | 2010 | No | 2 | Yes | Heuristic | No | 17 hubs and 81 clients |
| Hamidi et al. | 2012 | Yes | 3 | No | Integer Linear Programming | No | 2 plants, 2 DCs, 2 RDs and 4 clients |
| Camargo et al. | 2013 | No | 2 | Yes | Integer Linear Programming and Benders Decomposition | No | 10 hubs, 100 points of collect and delivery |
| Hamidi et al. | 2014 | Yes | 3 | No | Heuristic | No | 30 plants, 30 DCs, 30 RCs and 380 clients |
| Rieck et al. | 2014 | Yes | 2 | Yes | Integer Linear Programming and Heuristic | No | 40 shippers, 6 branches, 100 clients |
| Rodríguez-Martín et al. | 2014 | Yes | 2 | Yes | Integer Linear Programming and Branch-and-cut | No | 50 hubs of collect and delivery |

Studies of LRP structures with multiple echelons and of Many-to-Many LRP structures are still restricted. Complementarily, it should be noted that the application of an exact model for solving a Many-to-Many LRP with multiple echelons has not been found in the literature. Thus, the simultaneous study of these two types of problems would be unprecedented and focused in a very important field of study of LTL problems. Table 1 shows the works found in the literature for LRP structures with multiple echelons and Many-to-Many LRPs.

3. METODOLOGY

The proposed model for a LTL network review must deal with solving a class of problems that brings together the decision on the amount and location of new consolidation facilities (hubs) with the allocation of routes from the origin to the final destination of a number of shipments (loads). These routes will be created based on the vehicles available at each terminal and able to collect, deliver, and transfer loads between terminals and/or between terminals and hubs.

Given the data necessary to calculate the total cost of a LTL operation, the process starts with the calculation of the shipping cost on a collect route, associated with the cost of transshipment and handling on a terminal with limited capacity of cross-docking responsible for this collect. Then, the possible transportation costs of transfer routes are calculated including the possible transshipment and handling costs at a terminal with limited capacity of cross-docking responsible for this delivery. Finally, it is calculated the transportation costs of delivery to their final destinations with the stipulated travel time constraints.

The optimal solution should be obtained by minimizing the total cost of the LTL operation.

The Mathematical Model is presented below.

3.1 Sets

C : set of shippers served by the LTL company;

C_j : subset of shippers collected by terminal j ($C_j \subseteq C$);

D : set of customers;

D_j : subset of customers served by terminal j ($D_j \subseteq D$);

J : set of local candidates for installation of terminals (actual and hubs);

J_d : subset of terminals candidates to deliver to customer d ($J_d \subseteq J$);

H : set of vehicles;

H_c : subset of vehicles addressed to collect from shippers $c \in C$ ($H_c \subseteq H$);

H_t : subset of vehicles to transfer to terminals $j \in J$ ($H_t \subseteq H$);

H_j : subset of vehicles attributed to terminal $j \in J$ for deliveries ($H_j \subseteq H$);

N : set of nodes, indexed by $n \in C \cup D \cup J$;

A : set of arcs, indexed by $(i, j) \in (C, J) \cup (J, J) \cup (J, D) \cup (D, D)$.

B : set of transfer arcs, indexed by $(a, b) \in (J, J) \times e$ ($B \subseteq A$).

3.2 Parameters

- c_j : fixed cost to open and maintaining terminal j ;
- cc_j : cost of loading at terminal j by unit of weight;
- cd_j : cost of unloading at terminal j by unit of weight;
- cf_h : fixed cost of vehicle h , including the driver cost;
- cv_h : variable cost of vehicle h by unit of traveled distance;
- O_i : total cargo offer by shipper i ;
- $D_{i,j}$: transported demand from shipper i to customer j ;
- D_i : total demand of customer i ;
- $l_{i,j}$: distance between nodes i e j ;
- Q_j : handling capacity of terminal j in weight;
- Q_h : transportation capacity of vehicle h in weight;
- l_{max} : maximum route distance allowed by law;
- j_c : terminal that collects from shipper c .

3.3 Binary Decision Variables

- $x_{i,j}^h$: 1 if vehicle h travel through arc (i, j) and zero, otherwise;
- t_j : 1 if terminal j is used and zero, otherwise;
- v_h : 1 if vehicle h is used and zero, otherwise;
- $x_{a,b}^{c,d,ht}$: 1 if transfer vehicle ht travel through arc (a, b) with cargo from shipper c to customer d and zero, otherwise;

3.4 Real Decision Variables

- $y_{i,j}^h$: flow of cargo through arc (i, j) transported by vehicle h ;
- $y_{a,b}^{c,d,ht}$: flow of cargo through arc (a, b) transported by transfer vehicle ht from shipper c to customer d .

3.5 Objective Function

$$\text{Min } Z = \sum_{j \in J} c_j t_j + \sum_{h \in H_c \cup H_j} c f_h v_h + \sum_{h \in H} \sum_{(i,j) \in A} c v_h l_{i,j} x_{i,j}^h + \sum_{h \in H} \sum_{j \in J, i \in N} c c_j y_{j,i}^h + \sum_{h \in H} \sum_{i \in N, j \in J} c d_j y_{i,j}^h \quad (1)$$

3.6 Constrains

$$\sum_{h \in H_j} x_{i,j}^h \leq 1 \quad \forall i \in D, \forall j \in J \text{ e } |H_j| > 1, \quad (2)$$

$$\sum_{h \in H_j} x_{j,i}^h \leq 1 \quad \forall i \in D, \forall j \in J \text{ e } |H_j| > 1, \quad (3)$$

$$\sum_{h \in H_j} \sum_{j \in D \cup J} x_{i,j}^h = 1 \quad \forall i \in D, \quad (4)$$

$$\sum_{h \in H_j} \sum_{j \in D \cup J} x_{j,i}^h = 1 \quad \forall i \in D, \quad (5)$$

$$\sum_{j \in D \cup J} x_{i,j}^h - \sum_{j \in D \cup J} x_{j,i}^h = 0 \quad \forall i \in D \cup J, \forall h \in H_j, \quad (6)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in N} y_{i,j}^h + \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} y_{j,i}^h \leq Q_j t_j \quad \forall j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{i \in D} y_{j,i}^h \leq Q_h v_h \quad \forall j \in J, \forall h \in H_j, \quad (8)$$

$$\sum_{i \in C} y_{i,j}^h \leq Q_h v_h \quad \forall j \in J, \forall h \in H_c, \quad (9)$$

$$\sum_{i \in J} y_{j,i}^h \leq Q_h v_h \quad \forall j \in J, \forall h \in H_t, \quad (10)$$

$$y_{i,j}^h - O_i = 0 \quad \forall i \in C, j \in J, h \in H_c, \quad (11)$$

$$\sum_{h \in H} \sum_{i \in N} y_{j,i}^h - \sum_{h \in H} \sum_{i \in N} y_{i,j}^h = 0 \quad \forall j \in J, \quad (12)$$

$$\sum_{h \in H_j} \sum_{j \in D \cup J} y_{i,j}^h - \sum_{h \in H_j} \sum_{j \in D \cup J} y_{j,i}^h + \sum_{c \in C} D_{c,i} = 0 \quad \forall i \in D, \quad (13)$$

$$\sum_{(i,j) \in A} l_{i,j} x_{i,j}^h \leq l_{max} v_h \quad \forall h \in H_j, \quad (14)$$

$$\sum_{b \in J} \sum_{h \in H_t} x_{a,b}^{c,d,h} = 1 \quad \forall (c \in C_a, d \in D_b), \quad (15)$$

$$y_{a,b}^{c,d,h} - D_{c,d} x_{a,b}^{c,d,h} = 0 \quad \forall (c \in C_a, d \in D_b) e \forall h \in H_t, \quad (16)$$

$$\sum_{c \in C_a} \sum_{d \in D_b} y_{a,b}^{c,d,h} - y_{a,b}^h = 0 \quad \forall (a \in J, b \in J) e \forall h \in H_t, \quad (17)$$

$$\sum_{a \in J_d} \sum_{h \in H_{J_d}} x_{a,b}^h - \sum_{h \in H_t} x_{a,b}^{c,d,h} \geq 0 \quad \forall b \in J_d e \forall (c \in C_a, d \in D_b), \forall b \in J_d \quad (18)$$

$$y_{i,j}^h - Q_h t_j \leq 0 \quad \forall j \in J, \forall h \in H_j, \forall (i \in J, j \in J), \quad (19)$$

$$y_{i,j}^h - Q_h x_{i,j}^h \leq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall h \in H, \quad (20)$$

$$x_{i,j}^h \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A, h \in H, \quad (21)$$

$$y_{i,j}^h \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall h \in H, \quad (22)$$

$$x_{i,j}^{c,d,h} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j) \in A, h \in H, \quad (23)$$

$$y_{i,j}^{c,d,h} \geq 0 \quad \forall (i, j) \in A, \forall h \in H, \quad (24)$$

$$t_j \in \{0,1\} \quad \forall j \in J, \quad (25)$$

$$v_h \in \{0,1\} \quad \forall h \in H. \quad (26)$$

4. APPLICATION

The model was tested, applied and validated with the optimization package Gurobi Optimizer 5.6.0 (Gurobi, 2015).

A practical application, related to a major Brazilian LTL operator involved 48 shippers, 15 collect and delivery terminals/hubs and 40 destinations. This application was addressed to revise part of the LTL network of one of the three largest LTL companies in Brazil. Figure 5 shows the modeling process of the practical application.

The results of the practical application were compared to the results from a market-leading software, Supply Chain Guru (Llamasoft, 2015), as shown in Table 2.

It is observed that the total cost obtained with the proposed methodology resulted in lower values than those currently practiced by the company. Another very important conclusion is that the results with the proposed model were better than those obtained by the global leader in supply chain design solutions (Llamasoft, 2015). This fact should reinforce what has already been stated by several authors, that the integrated solution of the location routing problem produces better results than with other methods currently being used.

Therefore, the methodology developed for the LTL strategic network review has proved in practice that, it does not require a representative financial investment and has produced results that indicate its ability to reduce existing costs and provide a simpler operating model. The results enabled the discussion of a new network process in the company, where the model was tested. In addition, there was the opportunity to show that the model is in line with the reality of the Brazilian LTL market and that it can fill a technical gap in the global market that is not enjoying the benefits of the LRP approach for this type of problem.

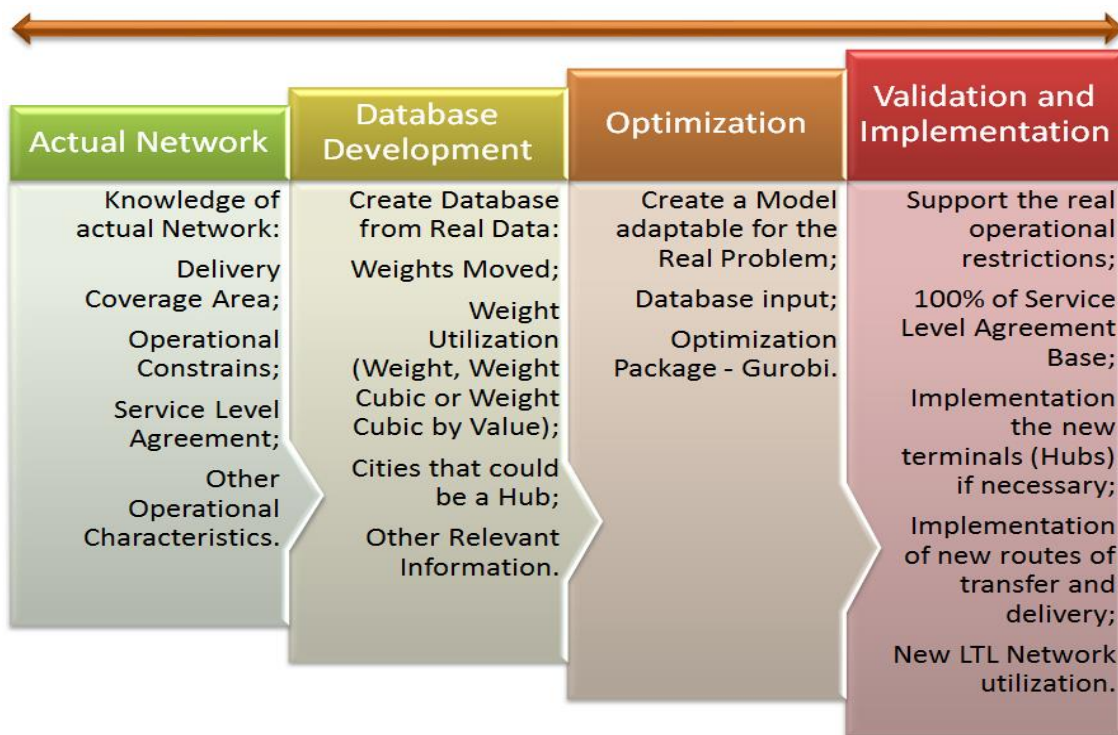


Figure 5. Modeling process of the practical application

Table 2. Costs analysis

| Cost Base | Total Cost | Dif. | Terminal Cost | Dif. | Transportation Cost | Dif. |
|-------------------|------------|--------|---------------|-------|---------------------|--------|
| Real | 99.734,07 | | 53.867,55 | | 45.866,52 | |
| Supply Chain Guru | 82.524,17 | -17,3% | 61.838,36 | 14,8% | 20.685,81 | -54,9% |
| Model | 79.312,75 | -20,5% | 59.628,04 | 10,7% | 19.684,71 | -57,1% |

| Cost Base | Total Cost | Dif. | Terminal Fixed Cost | Dif. | Handling Cost | Dif. | Transportation Fixed Cost | Dif. | Transportation Variable Cost | Dif. |
|-------------------|------------|--------|---------------------|------|---------------|-------|---------------------------|-------|------------------------------|--------|
| Real | 99.734,07 | | 20.272,71 | | 33.594,84 | | 7.936,11 | | 37.930,41 | |
| Supply Chain Guru | 82.524,17 | -17,3% | 21.181,80 | 4,5% | 40.656,56 | 21,0% | 13.254,21 | 67,0% | 7.431,60 | -80,4% |
| Model | 79.312,75 | -20,5% | 21.181,80 | 4,5% | 38.446,24 | 14,4% | 13.845,11 | 74,5% | 5.839,60 | -84,6% |

5. CONCLUSIONS

The research focused on developing a mathematical model to solve the Location Routing Problem. A Mixed Integer Linear Programming model was proposed, tested and applied to a real Brazilian case with the aid of the optimization package Gurobi Optimizer 5.6.0 (Gurobi, 2015).

The total cost obtained in the practical application with the proposed model resulted in lower values than those currently practiced by the Brazilian company. The results with the proposed model were even better than the ones obtained by the company with a market-leading software, the Supply Chain Guru (Llamasoft, 2015).

Given the results and the knowledge gained with the development of this work, we suggest the following research developments:

- The application of the model in other segments or modes of transportation, to test the width of the proposed model.
- The inclusion of environmental analysis to the model, as well as safety and other variables not assessed in this study.
- Considering the reference of Hamidi et al. (2012, 2014), to develop an alternative mathematical model based on heuristics or metaheuristics, to further expand the size of the analyzed networks.
- To explore the opening and closing not only of the hubs, but also of the terminals responsible for the collect.
- Another opportunity of contribution is the resolution of a structure Many-to-Many LRP with multi echelons, which was not found in the literature.

REFERENCES

AKCA, Z. BERGER., R. and RALPHS, T. (2009). *Modeling and Solving Location Routing*

- and Scheduling Problems*. Industrial and System Engineering, Report: 08T-009.
- AMBROSINO, D., and SCUTELLÀ, M. (2005). *Distribution Network Design: New problems and related models*. European Journal of Operational Research, vol. 165, pp. 610-624.
- AZARMAND, Z., and JAMI, E. (2009). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. Springer, Library of Congress 2009922331, pp. 93-110.
- BARRETO, S., FERREIRA, C., PAIXÃO, J., and SANTOS, B. (2007). *Using clustering analysis in a capacitated location-routing problem*. European Journal of Operational Research, vol. 179, no. 3, pp. 968-977.
- CAMARGO, R., MIRANDA, G., and LOKKETANGEN, A. (2013). *A new formulation and an exact approach for the many-to-many hub location-routing problem*. Applied Mathematical Modelling, vol. 37, pp. 7465-7480.
- ÇETINER, S., SEPIL, C., and SURAL, H. (2010). *Hubbing and routing in postal delivery system*. Industrial Engineering Department, Ankara.
- CUNHA, C., and SILVA, M. (2007). *A genetic algorithms for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil*. European Journal of Operational Research, vol. 179, pp. 747-758.
- DREXL, M., and SCHNEIDER, M.A. (2013). *Survey of location-routing problems, Technical Report LM-2013-03*. Gutenberg School of Management and Economics, Johannes Gutenberg University, Mainz, 2013.
- GUERRA, L., MURINO, T., and ROMANO, E. (2007). *A heuristic algorithm for the constrained location - routing problem*. International Journal of Systems Applications, Engineering & Development, Issue 4, volume 1.
- GUROBI (2015). <http://www.aimms.com/aimms/solvers/gurobi>, in: May 18, 2015.
- HAMIDI, M., FARAHMAND, K., and SAJJADI, R. (2012). *Modelling a Four-Layer Location-Routing Problem*. International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 3, pp. 43-52.
- HAMIDI, M., FARAHMAND, K., SAJJADI, R., and NYGARD, K. (2014). *A heuristic algorithm for a multi-product four-layer location-routing problem*. International Journal of Industrial Engineering Computations, vol. 3, pp. 87-100.
- LLAMASOFT (2015). Disponível em: <http://www.llamasoft.com/products.html>, in: January 20, 2015.
- LEE, J., MOON, K., and PARK, J. (2010). *Multi-level supply chain network design with routing*. International Journal of Production Research, vol. 48 No. 13, pp. 3957-3976.
- MIN, H. (1989). *The multiple vehicle routing problem with simultaneous delivery and pick-up points*. Transportation Research, vol. 23A, pp. 377-386.
- NAGY, G., and SALHI, S. (2007). *Location-routing: Issues, models and methods*. European Journal of Operational Research, vol. 177, no. 2, pp. 649-672.
- NAGY, G., and SALHI, S. (1998). *The Many-to-Many Location Routing Problems*. Sociedad de Estadística e Investigación Operativa, vol. 6, no. 2, pp. 261-275.
- PILLAC, V., GENDREAU, M., GUERÉT, C., and MEDGLIA, A. (2013). *A review of dynamic vehicle routing problem*. European Journal of Operational Research, vol. 225, pp.

01-11.

PRODHON, C., and PRINS, C. (2014). *A survey of recent Research on Location-Routing Problems*. European Journal of Operational Research, vol. 238, pp. 01-17.

RIECK, J., EHRENBERG, C., and ZIMMERMANN, J. (2014). *Many-to-many location-routing with inter-hub transport and multi-commodity pick-up-and-delivery*. European Journal of Operational Research, vol. 236, pp. 863-878.

RODRÍGUEZ-MARTÍN, I., SALAZAR-GONZÁLEZ, J., and YAMAN, H. (2014). *A branch-and-cut algorithm for the hub location and routing problem*. Computers & Operations Research, 50, pp. 161-174.

TUZUN, D., and BURKE, L. (1999). *A two-phase tabu search approach to the location routing problem*. European Journal of Operational Research, vol. 116, no. 1, pp. 87-99.

WAN, F., and ZHANG, Q. (2008). *Study on the location routing problem of the multi-stage logistics network*. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 4th International Conference, pp. 01-05.

WASNER, M., and ZÄPFEL, G. (2004). *An integrated multi-depot hub-location vehicle routing model for network planning of parcel service*. International Journal of Production Economics, vol. 90, pp. 403-419.

ZARANDI, M., HEMMATI, A., and DAVARI, S. (2011). *The multi-depot capacited location-routing problem with Fuzzy travel times*. Expert Systems with Application, vol. 38, no. 8, pp. 10075-10084, 2011.

18 Models for estimating the travel time variability of air transportation

Fernanda David Weber

Federal University of Pelotas, Brazil

Ana Margarida Larrañaga Uriate

Luiz Afonso dos Santos Senna

Federal University of Rio Grande do Sul, Brazil

ABSTRACT

The demand for transport is derived and it is related to the need to overcome the physical barriers involving displacements and, hence, time. The clock drives modern society, and time can be considered a greatly important variable in the daily dynamics. The transport systems play a fundamental role in ensuring that this dynamic may satisfy as expected. Therefore, the transport systems must provide a reliable service, resulting in a minimal *travel time variability*. This study aims to understand the behavior of the user of air transport in the presence of the *travel time variability*, by estimating behavioral models according to two approaches: Polak's model, whose functional form is a quadratic polynomial, and Senna's model, whose functional form depends on the data collected. The study was conducted in Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brazil, with travelers attending the Salgado Filho International Airport. The results show that the users of air transport are conservative when it involves delays in their travels.

Key words: Travel time variability, stated preference, air transport

1. INTRODUCTION

The travel time is not a constant, but a variable. Various components of the traffic system may interfere directly and indirectly in the variability of this time. Thus, we can say that the concept of *travel time variability* (TTV) presupposes that, with respect to the path to be held during the trip, people's choices must be made without the real knowledge of the *travel time* involved. As a consequence, they won't be able to predict the *travel time* or the arrival time at the destination without starting the trip at first (Li et al., 2010).

The knowledge of the users of transport systems regarding the likelihood of a given *travel time* is related to the different sources of TTV. All modes of transport may be more or less reliable, but there is always a degree of irregularity involved in any trip. The relevance of the TTV problem for each traveler depends among other things, on the arrival time

constraints and the reason of the trip.

As in various dimensions and modes of transport, air transport suffers from delays. This mode plays a central role in economic activities. In Brazil, due to its continental dimensions, this kind of transport is even more significant in both terms: for economic development as well as for leisure and cultural activities (Weber et al., 2015).

Economic growth and income, coupled with the scarcity of other modes of transport, led to an expansion of commercial aviation in Brazil. In the 1990s, it started the reshuffle policy of the Brazilian commercial aviation, which gradually removed the control over the economic variables of the sector. The new model of management associated to the economic stability of the country, which led to the increased purchasing power of the population, strongly pushed the aviation market. Many people restarted their journeys using this mode and others made their first air trip (Weber et al., 2013).

Technological advances in aircrafts, bigger and heavier, brought problems to the airport infrastructures. The demand increased significantly during the first decade of this century, but the infrastructure of airports could not keep up with such growing market. This factor caused delay in travel by air transport.

Despite the fact that the air transportation system relies on an infrastructure which is unique, without interaction with other modes, ensuring to the users a more regulated, distributed and efficient traffic (Fosgerau et al., 2008), delayed flights has been frequent in Brazilian airports, regardless of the airline. Any delay, even a small shift at the beginning of the chain, may lead to detrimental consequences to travelers, independently of the used mode (Rietveld et al., 2001). In the case of air transport, a delay in the opening hours of the aircraft doors to start boarding, can lead to a late takeoff for an appointment. This fact provokes changes in the contracted service, as the traveler does not arrive at the destination airport at the scheduled time. If the delay is significant, the traveler may end up missing the connecting flight or even the appointment or business opportunity, which was the reason for his travel.

Therefore, understanding the effects of TTV, in the behavior of the air transport user, can become a competitive advantage for airlines. This variable can influence not only the decision regarding the departure time, but also the choice of the airline. This paper aims to evaluate the behavior of the user of air transport in the presence of TTV using the analysis of expected utility function of: i) Polak's approach (Polak, 1987) and ii) Senna's approach (Senna, 1994a).

2. TRAVEL TIME VARIABILITY IN TRANSPORT

The concept of TTV is implied in any travel demand analysis. At first, it was originated by the needs and desires of people when participating in various activities that are spatially

distant. Their needs and desires are determined by the characteristics of each individual, including life cycle, life style and many socioeconomic factors (Pas, 1987).

Travel demand models seek to explain the differences in the travel behavior of individuals, in terms of their socio-demographic characteristics and the location of their homes. For the researchers on travel behavior, there is a consensus that a transport system without congestion is not a feasible realistic goal (Banister, 2008). Traffic jams and other sources of *travel time variability*, necessarily lead to the need of questions about what would be the acceptable or reasonable level of congestion resulting in the fact that only the minimization of *travel time* cannot be the basic premise of behavior. Thus, the evaluation study that considers only the *average travel time* may be an overly simplistic proposition. Therefore, it is necessary to take into consideration the opposite behavior, for a representative distribution of travel times (Alves, 2014).

According to Alves (2014), when considering a distribution of travel times, it is important to study the issues related to the reliability of transportation systems. Several studies indicate that the reliability, in particular, the *travel time*, is a highly desirable feature for a transport system. In many cases, users attribute more value to a gain in *travel time reliability* (average time) than to a reduction in *average travel time* (Bates et al., 2001; Liu et al., 2004; Small et al., 1999).

According to Bates et al., (2001), reliability is associated to the statistical concept of variability (consistency of a set of measurements). Therefore, the TTV can be represented by a distribution of travel times for a certain period of time. From this distribution, it is possible to calculate the *average travel time* (mean of the distribution) and the *travel time variability* (standard deviation). Batley (2007) and Fosgerau et al., (2008) discussed the differences between the terms reliability and variability, but both are still used. Briefly, it can be said that the *travel time reliability* is the reflex of the *travel time variability* of the users (Alves, 2014).

3. MODELING TRAVEL TIME VARIABILITY IN TRANSPORT

Several idealizations, principles and models based on particular theories have been formulated to predict and/or analyze the formation of preferences and choice behavior in different application contexts (Timmermans, 2010). The discrete choice models (Ben-Akiva and Lerman, 1985), which are based on the rationality's principle, are the most used in transport, mostly to estimate the *value of travel time variability* (VOV). Generally, those models are estimated using data collected from stated preference experiments (SP), or revealed preference (RP) using factual distributions of travel time (Carrion and Levinson, 2012; Li et al., 2010).

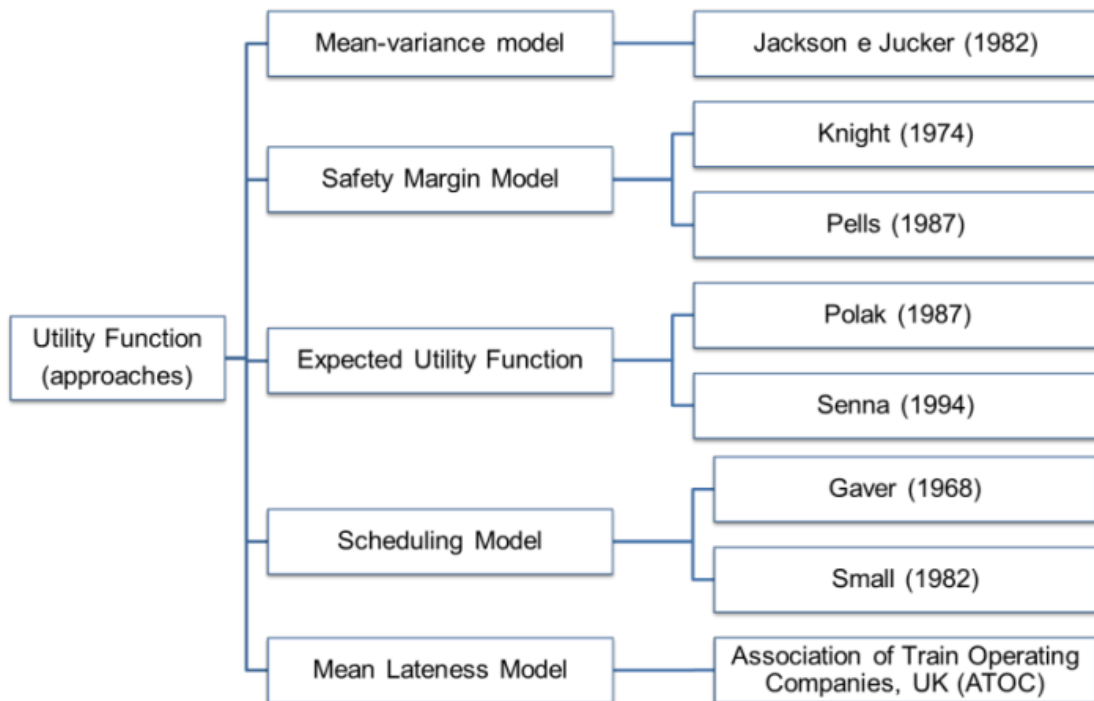


Figure 1. The utility function approaches in transport to study TTV

Source: Adapted by authors (Carrion and Levinson, 2012; Li et al., 2010; Senna, 1994a)

In Figure 1, it was decided to use the approach of expected utility presented by Polak (1987) and Senna (Senna, 1994a; Senna, 1994b). The choice was based on the viability of obtaining linear or non-linear models for the variables involved in the study. Senna's model also allows the identification of the target against the risk behavior because it combines microeconomic theory in its design. In this study, the risk is represented by the *travel time variability*: the higher, the greater the risk of delays.

3.1 Expected Utility models

An important feature to be considered is the expected utility theory, based on decision-making under risk. In other words, there is a difference between risk where the odds are known or at least predictable, and uncertainty, where probabilities are unknown. Senna's model comes to risk-behavior situations, and the functional form model determines the attitudes of decision makers in these situations. Such functional form can be set based on regression analysis experiments (situations of trade-off, providing observations to estimate the utility function) or computationally convenient ways (Hazell and Norton, 1986).

Several functional forms have been considered to understand the traveler's behavior in risk situations. Polak (1987) defined traveler's utility function as a second-degree polynomial (quadratic function) with respect to variable travel time (t), shown in Equation (1). Polak's model can be defined as a combination of mean-variance with utility function.

$$U = \gamma_1 * t + \gamma_2 * t^2 \quad (1)$$

The formula presented in Equation (1) is known in microeconomics as equivalent to the mean-variance model, designated by the expected utility theory. To demonstrate this, the expectation operator in the second-degree polynomial must be applied, resulting in Equation (2).

$$E(U) = \gamma_1 * E(t) + \gamma_2 * \{[E(t)]^2 + Var(t)\} \quad (2)$$

Note that, the omission of the additional term $[E(t)]^2$ in Equation (2) can influence the estimated parameter γ_2 . In addition, γ_2 indicates if the traveler prefers alternatives with high TTV (risk-lovers), low TTV (risk-aversion) or if he is only concerned with the expected travel time (risk-neutral) (Carrion and Levinson, 2012).

Senna (1994a) proposed a generalized form, based on Polak model, which is represented by an algebraic term with β degree, as shown in Equation (3).

$$U = \gamma_1 * t^\beta \quad (3)$$

In this case, Equation (3) can be written in the expected utility function terms, applying the expectation operator. The result is a polynomial with β degree, as shown in Equation (4).

$$E(U) = \gamma_1 * \left\{ \left[E\left(t^{\frac{\beta}{2}}\right) \right]^2 + Var\left(t^{\frac{\beta}{2}}\right) \right\} \quad (4)$$

Note that, in Senna's formulation, the terms involving the mean and variance are not viewed separately, as is in the Polak's formulation. Furthermore, Senna's formulation has certain properties. The parameter β measures the degree of risk aversion or love, according to travelers, based on microeconomic theory. Another point to be considered is that the value of travel time (VOT) and the value of travel time variability (VOV) depend directly on the travel time distribution.

3.2 Individuals attitudes towards risk

One of the first studies on decision-making in situations of risk can be attributed to Bernoulli (1738, translated by Sommer, 1954), which sought to explain why people feel aversion to risk and such aversion reduces with increasing income. Compared to this study, the interest in the decision-making process and behavior of choice in applied sciences, as in the case of transport, can be considered relatively recent (Timmermans, 2010).

The individuals behavior can be classified into three groups: a) Risk-lovers, they accept risks; b) Risk-neutral passengers, those who are indifferent to risks, and c) Risk-aversion

users, who do not like risky situations. These concepts are part of a well-known theory in economics, the expected utility analysis, which is qualified by Friedman and Savage (1948) as a "simple extension of the orthodox analysis of utility" (Senna, 1994a). Figure 2 presents an overview of the expected utility function for risk-averse, risk-lovers and risk-neutral behaviors.

The neutrality condition indicates that the individual is only interested in the value of the expected time and is very oblivious to the risk. When determining a general disutility function, as shown in Equation (1), it shows that this condition is valid for the β value equal to 1. For an individual with risk-aversion behavior, it indicates that he is not interested in TTV. A person who has such behavior may be willing to pay high premiums to ensure that if there are delays, the penalties are high. Starting from the general disutility function, in Equation (1), this condition is satisfied for values of $\beta > 1$. On the opposite, the behavior of an individual who is risk-lover indicates that he prefers an uncertain outcome to a particular outcome with the same expected value. The utility function that identifies this behavior is strictly concave, and the risk-lovers can be identified for values $\beta < 1$.

4. METHODOLOGICAL PROCEDURES

The development of this work was carried out in four stages. The first involved the selection of the attributes that were used in the modeling procedure. In the second stage, an experimental project was designed using a full factorial design, allowing all effects and their combinations to be measured. The third stage included data collection, ranging from research design to the actual realization of the experiment. The fourth and final step was to estimate the models, comparing both approaches and the identification of the air transportation user behavior.

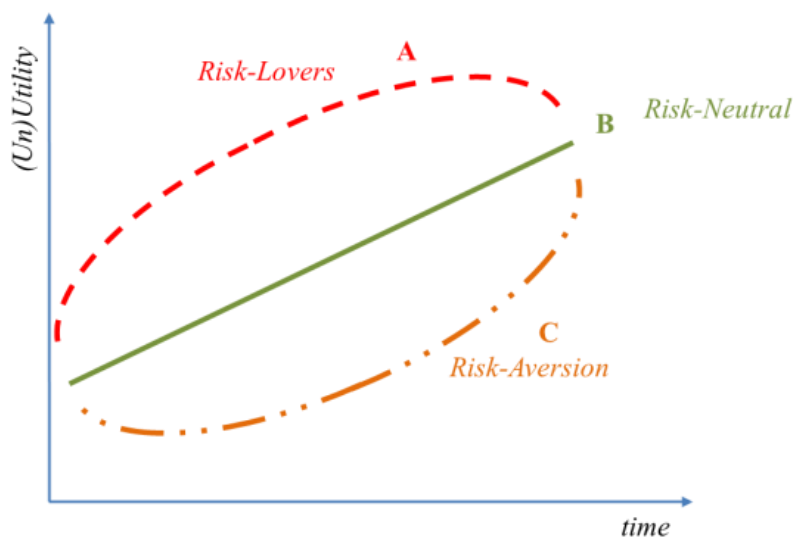


Figure 2. Utility function of risk-lovers; risk-neutral and risk-aversion individuals

Source: Adapted by the authors (Senna, 1994a)

4.1 Selection of the attributes

The selection of attributes used in the modeling started from a literature review. Several studies on the behavior of users of transport were reviewed. It was identified that, when evaluating the behavior of people facing risk in transportation, what is being studied is the opposite behavior to the TTV. This variable is usually presented in the form of a *travel time distribution*. In the present study, this variable was presented as *travel time distribution*. The *cost* involving displacements and its possible variations were also considered.

In order to ascertain the existence of any particular attribute in transportation, a qualitative survey was conducted through individual interviews with the target audience. There were not found many studies involving the TTV in air transportation, in the reviewed literature. Previous studies had been applied to evaluate the behavior of the users of the road transport modes (public or private, urban or not) and also of the railway mode. The qualitative survey resulted in the inclusion of the *stopover* attribute, which can also be associated with the overflow attribute, when the study is on road or railway modes.

4.2 Experimental project

In this step, the levels for each attribute were established. *Travel time*, *travel time variability* and *fare cost* attributes were determined on three levels (high, medium and low); while the *stopover* was determined on only two levels (with or without *Stopover* - dummy variable). Three levels were determined for the key attributes, and it was checked a possible non-linear relationship between them, which is the aim of this study. The values adopted for the levels of all attributes were set based on the air market reality. As the study was a full factorial, it considered all the possible combinations among the levels of all the studied attributes, ensuring not only the analysis of the main effects but also their interactions.

The values for the *fare cost* were determined based on the degree of planning of the traveler, which could ensure more affordable fares when the purchase occurs earlier. The high level considered buying the ticket three days before of the date of the travel. The average level considered buying it within fifteen days in advance, while the low level considered one month in advance.

The logic considered for the attributes of *travel time* and *travel time variability* was the same. The low level considered that the *average travel time* (mean of travel time distribution) was fifteen minutes longer than the regular average time flight evaluated in the study. The medium level considered adding thirty minutes to the regular average flight time, while the highest level considered an additional hour to the regular average flight time. The regular average time was based on the average travel times given by the airlines for the elasticity studied. The same procedure was used for defining the regular average time with the presence of *stopover*. The values of the levels of TTV were defined as those for *travel time*: low level was fifteen minutes; medium level was thirty minutes; and high level was one hour. However, as TTV was presented in the form of *travel time distribution*, the values of

the levels were expressed based on the standard deviations.

4.3 Data collection

The data was collected by means a technique, which is the most used when the goal is modeling TTV (Bates et al., 2001; Batley and Ibáñez, 2009; Fosgerau et al., 2008; Hensher, 2001a, 2001b; Noland et al., 1998; Small et al., 1999, 2005). This technique ensures that more data can be obtained from a small sample. This is possible because the tool presents scenarios to the respondents, collecting their behavior against a series of simulated situations and not only considering their usual behavior. Therefore, its cost becomes more accessible, particularly when the sample's size is significant.

The experimental project resulted in the study of 54 possible choice situations (03 x 03 x 03 x 02), which were divided into six group (blocks), with nine scenarios each one (Ortúzar and Willumsen, 2011). The choice of the semantic scale was based on the Berkson-Thiel transformation which determines the semantic association between the semantic and the numerical scales. That is shown in Table 1.

4.4 Evaluating Polak's and Senna's Models

Polak's and Senna's Models were estimated by the method of least squares applied to a logit binary model, in its linearized form. This method allows the application of the Berkson-Thiel Transformation to measure the probability of choosing one alternative. During the estimation procedure, the main effects of the evaluated attributes as well as their interactions were considered. Socioeconomic variables and their interactions with the key attributes were also considered, when estimating the final models.

5. ANALYSIS OF RESULTS

The data used in the present study was collected in October, 2014, in the check-in lobby, the waiting areas and the food court, of the Salgado Filho International Airport, in Porto Alegre. Interviewed passengers were selected randomly in each turn. A total of 697 air transport users were interviewed. Responses were validated, confirming that the choices occurred as expected, resulting in the identification of lexicographical individuals (those who always

Table 1. The association between semantic and numerical scales

| Semantic Scale | Numerical Scale |
|-------------------------|-----------------|
| Certainly alternative A | 0.9 or 90% |
| Likely alternative A | 0.7 or 70% |
| Indifferent | 0.5 or 50% |
| Likely alternative B | 0.3 or 30% |
| Certainly alternative B | 0.1 or 10% |

Source: Adapted from (Ortúzar and Willumsen, 2011)

choose the alternative in which the combination of the attributes evaluated is better) and captive individuals. Among the captive individuals, 63 replied to the questions based only on the lowest *fare cost* (9%); while 38 were driven by the regularity aspects - TTV equals to zero (6%). These individuals were removed from the analysis because the discrete choice models seeks to identify the points of trade-offs between variables, which did not occur in these cases. Thus, the final database included 596 interviews, totalizing 5.364 responses, representing 85% of the initial data.

6. ESTIMATION OF EXPECTED UTILITY MODELS

As previously mentioned, there are two models which follow the approach of the expected utility: the quadratic model of Polak and the generic model of Senna. Polak's model, adapted to the study, is shown in Equation (5).

(5)

The model based on Senna's approach does not assume a predetermined functional form. This is given by the β value, as was shown in Equation (4). The model adapted to the study is presented in Equation (6).

(6)

Table 2 shows the socioeconomic data; 46% were men and 54% were women. The age distribution shows that 28% of the sample was composed of individuals aged 26 - 35; 19% was under 25; 17% aged between 36 and 45; 16% aged 45- 55 years; 12% were between 56 and 64 and 8% were included in the third age group, those individuals 65 years old and over.

About the traveling habits, 33% of respondents said they travel at least twice a year, while 32% travel with a higher *frequency*. This information can be seen in Table 3, which shows the data related to the traveling patterns of the interviewees.

Another important point was the reason why respondents travel more *frequently*. According to Table 3, 60% of the respondents travel more often for leisure, while 31% travel due to business reasons. Regarding the destination, 71% answered to travel to different destinations, while 29% tend to travel more often (22%) or always (7%) to the same place.

6. ESTIMATION OF EXPECTED UTILITY MODELS

As previously mentioned, there are two models which follow the approach of the expected utility: the quadratic model of Polak and the generic model of Senna. Polak's model, adapted to the study, is shown in Equation (5).

$$E(U) = \phi + \theta * [E(t)] + \{[E(t)]^2 + [\sigma(t)]^2\} + \delta * Cost + \lambda * Stopover \quad (5)$$

The model based on Senna's approach does not assume a predetermined functional form. This is given by the β value, as was shown in Equation (4). The model adapted to the study is presented in Equation (6).

$$E(U) = \phi + \alpha * \left\{ \left[E\left(t^{\frac{\beta}{2}}\right) \right]^2 + \left[\sigma\left(t^{\frac{\beta}{2}}\right) \right]^2 \right\} + \delta * Cost + \lambda * Stopover \quad (6)$$

Table 2. The socioeconomic data of the respondents

| | Cat | Class | Total | |
|----------------|-----|----------------------------|-------|-----|
| Gender | 1 | Men | 275 | 46% |
| | 2 | Women | 321 | 54% |
| Marital Status | 1 | Married | 282 | 47% |
| | 2 | Single | 242 | 41% |
| | 3 | Separate | 51 | 9% |
| | 4 | Widower | 21 | 4% |
| Scholar Degree | 1 | Elementary School | 1 | 0% |
| | 2 | High School | 149 | 25% |
| | 3 | University Degree | 319 | 54% |
| | 4 | Postgraduate Degree | 127 | 21% |
| City Residence | 1 | Porto Alegre (local) | 182 | 31% |
| | 2 | Metropolitan Area | 100 | 17% |
| | 3 | Upstate | 118 | 20% |
| | 4 | Another State or Country | 196 | 33% |
| Age Group | 1 | Under 25 years of age | 112 | 19% |
| | 2 | From 26 to 35 years of age | 166 | 28% |
| | 3 | From 36 to 45 years of age | 104 | 17% |
| | 4 | From 46 to 55 years of age | 93 | 16% |
| | 5 | From 56 to 65 years of age | 72 | 12% |

| | | | | |
|-------------------------|---|-------------------------------------|-----|-----|
| | 6 | More than 65 years of age | 49 | 8% |
| Family Income (a month) | 1 | Until R\$ 1.400,00 | 8 | 1% |
| | 2 | From R\$ 1.400,01 to R\$ 2.800,00 | 27 | 5% |
| | 3 | From R\$ 2.800,01 to R\$ 4.900,00 | 96 | 16% |
| | 4 | From R\$ 4.900,01 to R\$ 7.000,00 | 178 | 30% |
| | 5 | From R\$ 7.000,01 to R\$ 10.500,00 | 144 | 24% |
| | 6 | From R\$ 10.500,01 to R\$ 14.000,00 | 67 | 11% |
| | 7 | More than R\$ 14.000,00 | 76 | 13% |

Table 3. Data related to the travel habits of interviewees

| | Cat | Class | Total | |
|---------------------------------|-----|------------------------------|-------|-----|
| Trip Purpose | 1 | Business | 185 | 31% |
| | 2 | Leisure | 357 | 60% |
| | 3 | Other | 54 | 9% |
| Trip Frequency | 1 | Two or more times a month | 77 | 13% |
| | 2 | Two or more times a semester | 129 | 22% |
| | 3 | Two or more times a year | 199 | 33% |
| | 4 | Other | 191 | 32% |
| Destination | 1 | Always the same | 42 | 7% |
| | 2 | Frequently the same | 132 | 22% |
| | 3 | Random | 422 | 71% |
| Responsible for Financial Costs | 1 | Own | 372 | 62% |
| | 2 | Employer | 110 | 18% |
| | 3 | Third person | 114 | 19% |
| Loyalty Program | 1 | No | 238 | 40% |
| | 2 | Yes | 358 | 60% |
| Importance of the Punctuality | 1 | Both, boarding and landing | 515 | 86% |
| | 2 | Boarding | 62 | 10% |
| | 3 | Landing | 15 | 3% |
| | 4 | Indifferent | 4 | 1% |

| | | | | |
|--|---|--------------------|---|----|
| | 5 | It's not important | 0 | 0% |
|--|---|--------------------|---|----|

For both Equations (5) and (6) β is the parameter that measures the impact of the expected *travel time*; α is the parameter that measures the impact of the relationship between *travel time* and *travel time variability*; δ is the parameter that measures the impact of *fare cost* and λ is the parameter that measures the impact of the *stopover* inserted as the dummy variable.

The first stage to estimate Senna's model was to define which value of β returns the best model (R_a^2). The experimental design allowed the value β to vary between zero and two, $0 < \beta \leq 2$. Within this interval, various values were tested for β , as well as their relations with R_a^2 , as shown in Figure 3. The best model resulted for $\beta = 1.30$, where R_a^2 was 0.4575 (confirmation occurred when comparing the fifth decimal place). The option to use more than two decimal places was just to identify the exact relationship of the risk behavior. The resulting value, $\beta = 1.30$, indicates that users of air transport were adverse to risk.

The next stage was to estimate Polak's and Senna's models, entering the main effects and some interactions, besides the socioeconomic factors.

Table 4 shows results of both models, it contains the main and the secondary effects and the significant socioeconomic variables resulting from the process. The results shown in

Table 4 indicate that the variables got the expected signals. In Senna's model, the secondary effects involving the variable that associates travel time with *travel time variability*, also presented the expected signal, indicating that these interactions result in disutility effects.

The *trip purpose* variable (Polak's model) and the *trip frequency* (Senna's model) shown negative signs. In the *trip's frequency* case, the belief is that the result came from the knowledge acquired by the respondents through their experiences in traveling on the same route. About the *trip purpose*, one possible explanation is linked to the importance of the activity to be held at the end of the shift. The offset is not usually considered a necessity, but a means activity that guarantees the satisfaction of the primary needs (work, leisure, study, health, etc.). So, the bigger the restrictions associated with the subject is, the greater is the concern regarding possible problems during the travel. Thus, the *trip purpose* does not contain any utility value for the respondents in itself. On the opposite, it represents a disutility. This can be confirmed when comparing these parameters in both models.

Socioeconomic variables, such as *gender*, *age group* and *trip purpose* are insignificant in both models, Polak's and Senna's. However, none of them was significant in this case. The same can be said about the interactions between the variables *travel time* plus *travel time*

variability and trip frequency, and trip purpose in Polak’s model. Both interactions are significant in Senna's model, but not in Polak’s model. The interaction between the variable travel time plus travel time variability and trip frequency is negative, showing that frequent travelers are more sensitive to changes in the travel time and travel time variability. Also, the interactions between travel time plus travel time variability with age and income group are negative. This result shows that older travelers with higher income are more sensitive to changes in the travel time and travel time variability. Socioeconomic variables and secondary effects common to both models were: (i) income level; (ii) interaction of the fare cost to itself (quadratic effect); and (iii) interaction between trip purpose and sponsor for fare cost. In both models, all these variables were significant and its impacts were similar.

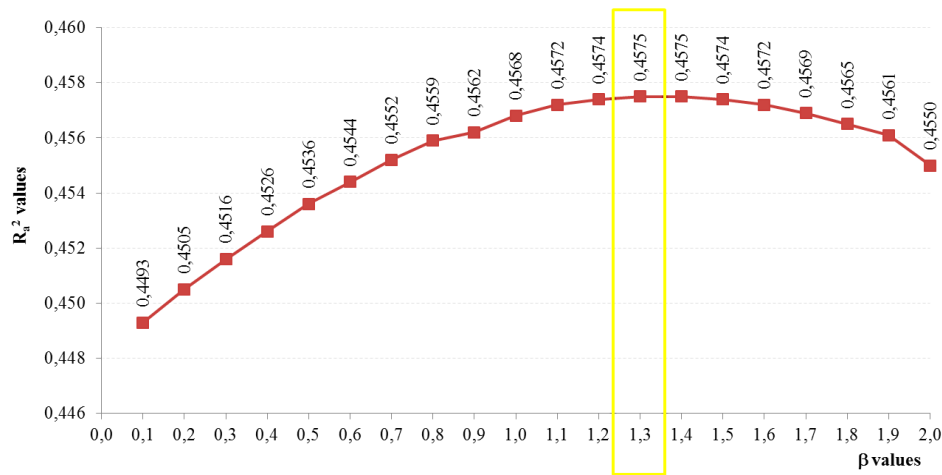


Figure 3. Relationship between β values and R_a^2 in Senna’s model

Table 4. Expected utility models

| Models | POLAK | | SENNA ($\beta=1,3$) | |
|--|------------|---------|-----------------------|---------|
| | Parameters | p-value | parameters | p-value |
| Intercept | 0.504 | 0.004 | 1.144 | 0.000 |
| Stopover | 0.1303 | 0.018 | 0.1159 | 0.001 |
| Fare Cost | -0.0123 | 0.000 | -0.0124 | 0.057 |
| [E(t)] | -1.547 | 0.000 | -- | 0.000 |
| {[E(t)] ² + [σ (t)] ² } -Polak | -0.1225 | 0.003 | -- | 0.000 |
| {[E(t ^{□/2})] ² + [σ (t ^{□/2})] ² } -Senna | -- | 0.000 | -0.344 | 0.000 |
| Gender | 0.1486 | 0.037 | -- | 0.000 |
| Age Group | 0.0882 | 0.000 | -- | 0.000 |
| Family Income Group | 0.1913 | 0.000 | 0.2104 | 0.000 |
| Trip Frequency | -- | 0.000 | -0.0686 | 0.078 |
| Trip Purpose | -0.2770 | 0.000 | -- | 0.000 |
| Fare cost ² | 0.000012 | 0.000 | 0.000012 | 0.000 |
| [E(t)]*Trip_purpose | 0.2721 | 0.004 | -- | 0.000 |

| | | | | |
|--|----------|-------|---------|-------|
| $\{[E(t)]^2 + [\sigma(t)]^2\} * Gender$ | 0.0228* | 0.194 | -- | 0.000 |
| $\{[E(t^{\beta/2})]^2 + [\sigma(t^{\beta/2})]^2\} * Age_group$ | -- | 0.000 | -0.0809 | 0.000 |
| $\{[E(t^{\beta/2})]^2 + [\sigma(t^{\beta/2})]^2\} * Income_group$ | -- | 0.000 | -0,1604 | 0,000 |
| $\{[E(t^{\beta/2})]^2 + [\sigma(t^{\beta/2})]^2\} * Frequency$ | -- | 0.000 | -0,0737 | 0,021 |
| $\{[E(t^{\beta/2})]^2 + [\sigma(t^{\beta/2})]^2\} * Trip_purpose$ | -- | 0.000 | 0,1205 | 0,013 |
| $\{[E(t^{\beta/2})]^2 * [\sigma(t^{\beta/2})]^2\}^2$ | -- | 0.000 | -1,465 | 0,001 |
| $Income_group * Trip_purpose$ | -- | 0.000 | -0,1148 | 0,000 |
| $Trip_purpose * Cost_trip_sponsor$ | 0.0177** | 0.097 | 0,0151* | 0,141 |
| R_a^2 | 0.5171 | | 0.5224 | |
| Number of Respondents | 596 | | | |
| Observations | 5,364 | | | |

(*) Significant for confidence level above 80%; (**) Significant for confidence level above 90%.

7. CONCLUSIONS

People's behavior is not constant, nor linear. It depends on the situation being experienced and on various other factors that may influence each particular situation. The conducted study that evaluated the behavior of air transport users under influence of *travel time variability* confirmed that this behavior is not linear, according to Senna's approach. It also shown that the travelers can be considered conservatives since the results of β were greater than one ($\beta > 1$).

In Polak's approach, it is difficult to determine the behavior of travelers against TTV. In this situation, the determination occurs through the parameter γ_2 . However, there were not found further studies indicating how to analyze risk behaviors in Polak's model. Therefore, this model was not considered the most appropriate for the present study.

Analyzing the interactions between the attributes, it was observed that the *travel time variability* presents a direct relationship with the *family income*, in Senna's model. It means that the higher the *family income*, the higher the disutility in the presence of *travel time variability*. The same can be said about the *age group* indicating that, older people become more demanding about the services contracted. Time and experience make that travelers become more sensitive to irregularities, in this case, delays. In Polak's model, none of these interactions was significant. In contrast, the effects of the interactions between *trip purpose* and *travel time*, and *travel time* associated to *travel time variability* and *gender* were significant in Polak's model, while they were not in Senna's model.

Comparing the results of the parameters, there are two attributes to be highlighted: *fare cost* and *stopover*. The *fare cost* parameter value was almost the same in both models. However,

the *stopover* resulted to have a more significant impact in Polak's model than in Senna's model.

REFERENCES

- ALVES, B. B. (2014). *O comportamento de viagens de acesso a aeroportos considerando a confiabilidade do tempo de viagem*. Universidade de São Paulo.
- BANISTER, D. (2008). *The sustainable mobility paradigm*. *Transport Policy*, 15(2), 73–80. doi:10.1016/j.tranpol.2007.10.005
- BATES, J., POLAK, J., JONES, P., and COOK, A. (2001). *The valuation of reliability for personal travel*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2-3), 191–229. doi:10.1016/S1366-5545(00)00011-9.
- BATLEY, R. (2007). *Marginal valuations of travel time and scheduling, and the reliability premium*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 43(4), 387–408. doi:10.1016/j.tre.2006.06.004.
- BATLEY, R., and IBÁÑEZ, J. N. (2009). *Randomness in preferences, outcomes and tastes; an application to journey time risk*. *International Choice Modelling Conference* (p. 1–27). Harrogate, UK.
- BEN-AKIVA, M. E., and LERMAN, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. MIT Press.
- BERNOULLI, D. (1954). *Exposition of a new theory on the measurement of risk*. *Econometrica*, 22(1), 23–36. doi:10.2307/1909829.
- CARRION, C., and LEVINSON, D. (2012). *Value of travel time reliability: A review of current evidence*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 46(4), 720–741. doi:10.1016/j.tra.2012.01.003.
- FOSGERAU, M., HJORH, K., BREMS, C., and FUKUDA, D. (2008). *Travel time variability Definition and valuation Mogens Fosgerau*.
- FRIEDMAN, M., and SAVAGE, L. J. (1948). *The Utility Analysis of Choices Involving Risk*. *The Journal of Political Economy*, 56(4), 279–304.
- HAZELL, P. B. R., and NORTON, R. D. (1986). *Mathematical programming for economic analysis in agriculture*. Macmillan Publishing Company, New York, USA.
- HENSHER, D. A. (2001a). *The valuation of commuter travel time savings for car drivers: evaluating alternative model specifications*. *Transportation*, 28, 101–118.
- HENSHER, D. A. (2001b). *Measurement of the Valuation of Travel Time Savings*. *Journal of Transport Economics and Policy*, 35(Part 1), 71–98.
- LI, Z., HENSHER, D. A., and ROSE, J. M. (2010). *Willingness to pay for travel time reliability in passenger transport: A review and some new empirical evidence*. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 46(3), 384–403. doi:10.1016/j.tre.2009.12.005.
- LIU, H. X., RECKER, W., and CHEN, A. (2004). *Uncovering the contribution of travel time reliability to dynamic route choice using real-time loop data*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 38(6), 435–453. doi:10.1016/j.tra.2004.03.003

- NOLAND, R. B., SMALL, K. A., KOSKENOJA, P. M., and Chu, X. (1998). *Simulating travel reliability*. *Regional Science and Urban Economics*, 28(5), 535–564.
- ORTÚZAR, J. D. D., and WILLUMSEN, L. G. (2011). *Modelling Transport. Modelling Transport* (4th ed). John Wiley & Sons. doi:10.1002/9781119993308
- PAS, E. I. (1987). *Intrapersonal Variability and Model Gooness-of-fit*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 21A(6), 431–438.
- POLAK, J. W. (1987). *More General Model of individual departure time choice*. PTRC Summer Annual Meeting (p. 247–258).
- RIETVELD, P., BRUINSMA, F. and VAN VUUREN, D (2001). *Coping with unreliability in public transport chains: A case study for Netherlands*. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(6), 539–559. doi:10.1016/S0965-8564(00)00006-9.
- SENNA, L. A. D. S. (1994a). *Users Response to Travel Time Variability*. The University of Leeds.
- SENNA, L. A. D. S. (1994b). *The influence of travel time variability on the value of time*. *Transportation*, 21, 203–228.
- SMALL, K. A., NOLAND, R. B., CHU, X., and LEWIS, D. (1999). *Valuation of travel time savings and predictability in congested conditions for highway user cost estimation*.
- SMALL, K. A., WINSTON, C., and YAN, J. (2005). *Uncovering the distribution of motorists' preference for travel time and reliability*. *Econometrica*, 73(4), 1367–1382.
- TIMMERMANS, H. (2010). *On the (Ir)relevance of Prospect Theory in Modelling Uncertainty in Travel Decisions*, 10(10), 368–384.
- WEBER, F. D., MANCUSO, A. C. B., SENNA, L. A. D. S., and ECHEVESTE, M. E. S. (2013). *Quality Function Deployment in Airport Terminals: The Airport of Porto Alegre Case*. *Journal of Traffic and Logistics Engineering*, 1(2), 222–227. doi:10.12720/jtle.1.2.222-227.
- WEBER, F. D., SENNA, L. A. D. S., LARRAÑAGA, A. M., and TEN CATEN, C. S. (2015). *O efeito da variabilidade do tempo de viagem no modal aéreo*. XXIX ANPET Congresso Nacional de Pesquisa e Ensino em Transportes (p. 2236–2247). Ouro Preto.

SECCIÓN 4

DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

URBAN DISTRIBUTION OF GOODS

19 Distribución urbana de mercancías en la Ciudad de México: tendencias corporativas y políticas públicas

Juan Pablo Antún †

Rodrigo Alarcón

Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico

RESUMEN

Las innovaciones logísticas son la clave para la competitividad metropolitana (Taniguchi et al., 2014). Esta competitividad debe leerse simultáneamente al interior de las prácticas logísticas corporativas y para la implementación de políticas públicas urbanas vinculadas a la distribución de mercancías. El artículo se centra en los procesos logísticos clave en prácticas logísticas corporativas de distribución urbana de mercancías en la Ciudad de México y en las políticas públicas del Gobierno de la ciudad vinculadas a esa problemática. Por una parte, se desarrollaron Estudios de Caso durante la realización de dos investigaciones por convenio: una con el Fideicomiso Ambiental de la Comisión Ambiental Metropolitana en la Zona Metropolitana del Valle de México (Lozano et al., 2006) y otra con la Secretaría de Desarrollo Económico del Gobierno de la Ciudad de México (Antún y Alarcón, 2015). Si bien en el artículo se mencionan las empresas en los Casos, sólo se hace referencia a la innovación en los procesos logísticos sin detallar, para respetar acuerdos de confidencialidad. Por otra parte, se realizó un estudio de las políticas públicas vinculadas a aspectos clave identificados en las tendencias corporativas. El proceso final, derivado del contraste entre las tendencias corporativas y la realidad de las políticas públicas, fue la caracterización de los aspectos obviados y olvidados, esencialmente en el discurso de las políticas públicas.

Palabras clave: Logística, distribución urbana de mercancías, Ciudad de México.

1. TENDENCIAS CORPORATIVAS EN DISTRIBUCIÓN URBANA DE MERCANCÍAS

A continuación se discuten cada una de las tendencias corporativas identificadas, y se hace referencia a Estudios de Caso realizados durante el desarrollo de una investigación realizada por convenio con el Fideicomiso Ambiental de la Comisión Ambiental Metropolitana en la Zona Metropolitana del Valle de México. Si bien se mencionan las empresas en los Casos, sólo se hace referencia a la innovación a los procesos logísticos sin detallar, para respetar acuerdos de confidencialidad.

Tendencia 1:

Reducción de inventarios mediante un sistema integrado por un único Centro de Distribución (CEDIS) y un conjunto de Centros de Carga de Pedidos (CCP) mediante “cross-docking” satélites para satisfacer niveles de servicio al cliente

Dado que los inventarios representan para la media de las diferentes actividades industriales, poco más del 30% de los costos logísticos, siempre existe una obsesión por reducirlos. La diversificación del “mix” ofertado al mercado y las exigencias de homogeneidad del nivel de servicio son los vectores que más disparan las existencias en distribución urbana metropolitana. Las estrategias actuales para la reducción de inventarios son:

a) Limitación logística a la expansión en SKU (“Stock-keeping unit”) del “mix” mediante una mejor gestión del ciclo de vida del producto. Una mejor interacción entre las áreas de Mercadotecnia y Logística en la empresa permite gestionar el ciclo de vida del producto y limitar la expansión en SKU del “mix” ofertado. Se trata de conservar los productos clásicos con calificación A y superior, sacar del “mix” los productos B- y de menor rotación, y controlar los tiempos de introducción, de disparo de ventas y de decline, de los productos nuevos de moda o de entrada por salida.

Caso 1: FEMSA Coca Cola maneja SKU de entrada por salida, considerando paquetes promocionales (navidad, temporada de ligas de futbol, etc).

b) Reducción del número de Centros de Distribución. Como lo señala la teoría de inventarios, la partición de un inventario con C_0 unidades de un SKU en un único Centro de Distribución (CEDIS) que permite atender con nivel de servicio s al mercado M (es decir: s de 100 consumidores en M son satisfechos) en n CEDIS con C_1, C_2, \dots, C_n unidades del SKU considerado, atendiendo con el mismo nivel de servicio s los segmentos territoriales M_1, M_2, \dots, M_n asignados del mercado atendido a cada CEDIS implica que el número total de unidades del SKU considerado, será aproximadamente igual al número original de unidades en la situación de un único centro de distribución C_0 multiplicado por la raíz cuadrada de n , la partición del inventario original (es decir, el número actual de centros de distribución). Obviamente la tendencia global más acentuada en distribución física urbana metropolitana es la de cerrar CEDIS para bajar el costo logístico y realizar distribución centralizada (Antún et al., 1997; McKinnon y Woodburn, 1994; Quarmby, D.; 1989).

Caso 2: Recientemente UNILEVER consolidó la operación logística de diferentes unidades de negocio, adquiridas en los últimos años por asociación y fusión, cerrando CEDIS en la operación de distribución metropolitana.

c) Evaluación y seguimiento de la tipología de los productos que integran el “mix” con base en el nivel de rotación según segmentos territoriales del mercado atendido. Como las empresas no ponen en el mercado un sólo producto sino una canasta o “mix” de productos, el costo de los inventarios también se incrementa en la medida que este “mix” se expanda

diversificándose según el nivel de adaptación que se busque a las necesidades de los clientes (customización). El nivel de rotación de cada SKU se calificará según sea de alta (A), media (B) y baja rotación (C, D); incluso puede discriminarse más el nivel de rotación (por ejemplo: A+, A, A-). Esta calificación debe monitorearse continuamente. Si las condiciones del mercado y las prácticas de la competencia obligan a abrir nuevos centros de distribución, para evitar la explosión de los costos logísticos, las prácticas actuales restringen esa partición del inventario sólo a los productos de más alta rotación.

Caso 3: La alianza de AIRES DEL CAMPO, una prestigiosa comercializadora de productos orgánicos certificados, con WalMart considera la segmentación del “mix” según localización de las tiendas SUPERAMA.

d) Jerarquización de inventarios con base en el nivel de rotación de los artículos en el “mix”. Lo señalado en el punto anterior conduce a que los inventarios se respalden entre los centros de distribución para asegurar bajos costos y un nivel adecuado del servicio al cliente: normalmente se adopta un CEDIS como central, donde se mantienen las existencias para atender con nivel de servicio s toda la demanda de los productos C y D, y se particiona el inventario sobre toda la Red de Centros de Distribución sólo para los artículos A y B; muchas veces se vigila el espectro de SKU con calificación B para particionar solamente aquellos SKU donde la exposición a riesgos frente a la competencia sean mayores.

Caso 4: FEMSA Coca Cola segmenta el “marketing mix” en CEDIS según nivel de rotación de cada SKU.

e) Gestión de niveles de seguridad en inventarios en CEDIS mediante respaldo de CEDIS central. Una tendencia reciente aplica una estrategia más sofisticada de diferenciación de los niveles de servicio s_1, s_2, \dots, s_n para cada segmento de mercado territorial atendido por cada Centro de Distribución (CEDIS) para un mismo SKU con nivel de rotación A, con un respaldo para rupturas de inventario asignado a C_{0*} (nótese que ahora C_{0*} es mayor que C_0 considerado en los puntos anteriores donde sólo existía un mismo s para todos los CEDIS).

Caso 5: La gestión de inventarios en almacenes de refacciones (repuestos, autopartes) de distribuidoras de NISSAN está protegida con un inventario central en Toluca (y con un segundo respaldo en Los Ángeles, USA para los vehículos importados) y envíos de paquetería industrial por ESTAFETA.

f) Implantación de “cross-docking” satélites para garantizar un nivel de servicio homogéneo de atención a segmentos territoriales periféricos de mercado. El cierre de CEDIS puede poner en riesgo la respuesta eficiente al consumidor (ECR), en particular en i) áreas metropolitanas territorialmente extensas, como la Zona Metropolitana del Valle de México, y en ii) áreas urbanas con una estructura espacial interna y red vial compleja, como en los Centros Históricos. Una estrategia para mitigar estos riesgos es la implantación de “cross-docking”

satélites de un CEDIS, obviamente con un solo inventario en tránsito para surtir múltiples pedidos en una jornada, mediante una familia de rutas de entrega (por ejemplo con un “cross docking” en una microplataforma logística urbana en el Centro Histórico para integrar las unidades de carga de vehículos eléctricos para entrega a detallistas) o para articular niveles jerárquicos en una ruta de entrega en un territorio del mercado distante (por ejemplo mover desde un CEDIS al final de la jornada, producto en un vehículo articulado a una microplataforma logística urbana en una zona periférica de acceso conflictivo -que puede obligar a un gran tiempo de viaje si la operación se realizara durante la mañana-, para que esté disponible al inicio de la jornada y puedan lanzarse temprano una/dos rutas locales de entrega).

Caso 6: FEMSA Coca Cola opera en algunos CEDIS la carga de camiones en la tarde que se envían a un estacionamiento periférico, para iniciar el reparto al inicio de la mañana, reduciendo entonces sustancialmente el recorrido troncal (o largo) para concentrarse en los recorridos locales de entrega.

Tendencia 2:

Desarrollo de alternativas innovadoras para el procesamiento de pedidos y atención a clientes

El Procesamiento de los Pedidos es uno de los cuatro procesos logísticos clave y está intrínsecamente asociado a otros dos, la Gestión de Inventarios y el Servicio al Cliente.

El ciclo del pedido, cuyas operaciones definen el “lead time” (período de tiempo entre la oportunidad en que el cliente coloca el pedido y el momento en que lo recibe) en gran medida depende de la manera en que se Toma el Pedido:

a. Si el cliente siempre puede ordenar un SKU del catálogo, el pedido se procesará con base en existencia en inventarios o en el programa de producción en curso o en la programación prevista; el cliente estará inicialmente satisfecho porque ha encontrado lo que busca, y en muchos casos lo que habitualmente desea encontrar; la empresa tendrá también una invaluable respuesta veraz del mercado para fines de previsiones de “marketing”; sin embargo, puede ocurrir que el pedido no pueda ser satisfecho por algún problema en la cadena de suministro. Dado que no es conveniente no integrar el pedido sobre la unidad de carga en el transporte de entrega que generalmente es gestionado y operado por un Operador Logístico, que fue pre-avisado en el momento del pedido (con algún sistema) la tendencia actual es que el Servicio al Cliente buscará resolver esta dificultad comunicándole al cliente la posibilidad de realizar alguna sustitución con base en el “mix” disponible, o procesando un pedido incompleto con algún tipo de compensación (descuento, regalo de artículo en promoción, etc).

b. Si el cliente siempre puede ordenar sólo un SKU validado del catálogo, entendiendo por validado que hay existencia en inventarios o en el programa de producción en curso, ningún

pedido no podrá no ser atendido; la cuestión es que la empresa está perdiendo información valiosa sobre las necesidades del mercado (a veces existe un módulo que recoge los pedidos que no pudieron ser atendidos por cancelación transitoria del código).

En la industria de productos de consumo masivo no duradero (alimentos procesados, abarrotes, bebidas, productos de cuidado personal, etc) según las empresas, se combinan estas dos modalidades:

(i) Producción del Catálogo (según los Pronósticos de Venta, a los que se superponen las Metas de Venta) y “push” sobre el mercado.

Caso 7: PROCTER & GAMBLE tiene una logística integrada exitosa basada en un seguimiento estricto de las tendencias del mercado.

(ii) Recepción de Órdenes y producción sincrónica conforme al “pull” del mercado.

Caso 8: UNILEVER sigue de cerca los pasos de su permanente competidor, aunque se basa más en un catálogo validado.

En el caso de manufactura de productos de consumo masivo duradero (electrodomésticos, ropa de nicho “premium”, etc.) otra tendencia que permite reducir inventarios, mejorar el “matching” entre producción y demanda, y procesar mas efectivamente los pedidos, es el diseño de los productos que contemplan el postacabado logístico, que permite customizar. Esta estrategia que combina un enfoque “push” de la producción con un acadaado “pull” del producto es un buen compromiso para atender la demanda en mercados metropolitanos y reducir los costos logísticos de la distribución física.

Caso 9: YAZBEK un fabricante líder de playeras, realiza una producción continua y posterior gestión de inventario del producto sólo en blanco, y lo tiñe de color en la medida que las órdenes de los clientes lo requieran.

Finalmente, conviene destacar que como las nuevas prácticas en el Procesamiento de los Pedidos toman en cuenta los requerimientos logísticos de los clientes, cada vez cobra más fuerza la tendencia de segmentar a los clientes según los requerimientos logísticos, lo que permite el diseño de cadenas logísticas ad hoc, que al aprovechar economías de escala (segmento de clientes), resultan de menor costo.

Tendencia 3:

Procesamiento de pedidos por lotes y limitación a la pulverización de las entregas de comercio electrónico

Las prácticas logísticas en comercio electrónico pueden discriminarse según dos procesos clave:

- *El Procesamiento del Pedido* donde siempre se procesa en lotes (es decir no en forma continua a la recepción de cada pedido, sino cuando se acumula un lote mínimo de pedidos, o en oportunidades de tiempo determinadas, o según el valor del pedido supere un umbral) y generalmente no se distingue el territorio de entrega (porque en general sólo existe un único Centro de Procesamiento de Pedidos, que puede también ser un verdadero CEDIS de los productos A del catálogo, y un vínculo tipo B2B (“business-to-business”) con los CEDIS de los proveedores del catálogo; en este último caso de manera cada vez más frecuente, existe el mismo Operador Logístico trabajando las operaciones en ellos).
- *La Entrega*, que incluye el Transporte de Entrega y el acto mismo de la Entrega, que está sufriendo cambios rápidos en las prácticas logísticas en la distribución urbana metropolitana, según el nivel de demanda por telecompra, de las características de la zona urbana y de la disponibilidad y aceptabilidad (por el consumidor) de puntos de entrega alternativos a los domicilios declarados en la telecompra.

Para sostener la competitividad del comercio electrónico con compradores en áreas urbanas, los costos logísticos de la distribución física urbana metropolitana deben no sólo controlarse sino buscar procedimientos alternativos para la entrega que impliquen costos menores.

En la medida que el comercio electrónico se extiende cada vez más, tanto los operadores logísticos especializados como las autoridades de los municipios están percibiendo la importancia de limitar la pulverización de las entregas, que comienzan a generar congestión por el incremento de los vehículos de entrega en la red vial y en la extensión del período pico, concentrados en las horas del final de la tarde cuando los consumidores pueden recibir los envíos porque están de vuelta del trabajo en sus casas (Galván, 2004).

Al respecto, las últimas tendencias en prácticas logísticas se concentran en involucrar al comprador en la producción de la distribución física de lo que se llama la última milla del proceso de entrega, que es donde se concentran los mayores costos; en particular se están implementando soluciones de dos tipos (Omwando, 2004):

- i) Habilitar en puntos de venta tradicionales la entrega del producto, que en este caso siempre tendrá un precio de descuento respecto al precio del catálogo (nótese que este último puede ser igual o menor costo que el precio de anaquel).
- ii) Equipar puntos de afluencia –tales como las terminales de transporte público de pasajeros (estaciones del Metro, del ferrocarril suburbano, y cabeceras de líneas de autobuses), estacionamientos públicos con localización estratégica, áreas de servicio de oficinas de correo, locales específicos en centros comerciales- con una infraestructura de “baterías de lockers” con pantallas de leyenda variable (con los códigos de los pedidos ahí ubicados y en cuál “locker” se entrega) y conectadas a un “software” de control de abertura, donde los consumidores pasan a retirar sus e-pedidos basados en información enviada con anterioridad por correo electrónico que indica el lugar cercano a su domicilio donde está el “locker”

determinado que lo contiene, así como el código llave para su apertura y retiro (estas experiencias se están extendiendo en las ciudades de la Europa el Norte, en particular de Alemania y de los países escandinavos).

En los Centros Históricos y en las colonias centrales de algunas áreas metropolitanas donde están creciendo las compras por internet a los supermercados de productos genéricos (tales como el agua embotellada, los productos de limpieza, los abarrotes etc), o donde los mismos supermercados ofrecen el servicio de entrega sin cargo para compras no presenciales en las tiendas, que superan un monto mínimo (esto no sólo está ocurriendo de manera generalizada en ciudades europeas, sino también en Buenos Aires, Sao Paulo y Rio de Janeiro, y recientemente se empieza a ofrecer en ciertas colonias de la ciudad de México), las autoridades municipales están implementando en cabeceras de aceras y en “ochavas” de manzanas áreas para descarga de las “vans” de los operadores logísticos que están dando servicio a los supermercados, desde las cuales parten con “diablitos” a entregar a los diferentes edificios de departamentos; es importante destacar que estas operaciones están siendo realizadas, en gran medida, al final de la jornada, complicando aún más la congestión del tráfico en el período pico.

Por otro lado, también existen proyectos y algunas experimentaciones preliminares en las zonas periféricas de áreas metropolitanas con redes de transporte ferroviario suburbano, donde las estaciones -que a veces integran una infraestructura de estacionamiento para vehículos particulares con tarifas atractivas para usuarios del servicio de transporte que incita a no utilizar el vehículo nada más que para el viaje entre la casa y la estación de tren- han sido equipadas no sólo con terminales para telecompras en supermercados, sino con un local para recibir los pedidos (que llegarán a la estación durante el período valle de utilización del tren en vagones con diseño ad-hoc), y desde donde serán entregados a los consumidores cuando arriben a la estación al final de la jornada, para que los lleven a sus casas en sus propios automóviles. Esta gestión integrada de la movilidad de las personas y de la movilidad de las mercancías está siendo estudiada en detalle para replicar experiencias en ciudades europeas.

Caso 10: En el Area Metropolitana de la Ciudad de México la demanda basada en “e-bussiness” es aún limitada. Esencialmente la oferta es para estar presente en el mercado (MIXUP), para dar una oportunidad nueva a los consumidores (SANBORNS) y en algunos casos para esencialmente inducir más ventas presenciales a partir del catálogo en la web (LIVERPOOL). Cabe señalar que las ventas por Internet son poco significativas para los supermercados; el super en su casa se procesa y surte en la sucursal más cercana al domicilio (SUPERAMA); en este caso aún no se han reportado crisis logísticas en el servicio, cómo han sido reportadas en otras ciudades (Galván, 2004).

Tendencia 4:

Desarrollo de procesos y operaciones en logística inversa para satisfacer requerimientos de normas y políticas públicas de reciclado

Desde la perspectiva de la logística empresarial, la Logística Inversa está integrada por los procesos de gestión de:

i) *Retorno de productos*: los que fueron rechazados por agentes en el canal de comercialización o por el consumidor final, así como el excedente de inventarios por fin del ciclo de vida (por ejemplo: por cambio de temporada, caducados por fecha de vencimiento, etc).

ii) *Retorno para la reutilización de envases (acondicionamiento del producto), empaques (acondicionamiento del lote comercial), embalajes*: acondicionamiento del producto envasado y empacado en el vehículo del modo técnico de transporte principal en la cadena de transporte) y *unidades de manejo* (para el producto terminado en la cadena de distribución física, para el movimiento y posicionamiento de partes en el proceso de fabricación, para la gestión de proveedores en estrategias “kan-ban”).

iii) *Reutilización de materiales*: con base en estrategias específicas ciertos materiales pueden recuperarse para su reutilización; por ejemplo, los solventes en los procesos de extracción de aceites vegetales comestibles, los gases inhibidores de maduración en contenedores frigoríficos específicos para frutas, etc.

iv) *Reacondicionamiento de producto rechazado*: mediante procesos de rehabilitación y acondicionamiento, un producto rechazado puede ser nuevamente colocado en el mercado.

v) *Manejo de residuos y/o desechos a reciclar*, como los residuos y desechos de materiales del proceso de fabricación, los envases (si las reglamentaciones fomentan la devolución de éstos desde los consumidores a los puntos de venta), los empaques y los embalajes (en general consolidados en los puntos de venta al consumidor final), que frecuentemente son enviados a terceros para ser sometidos a procesos de reciclado.

vi) *Manejo de residuos y/o desechos peligrosos*, que pueden ser enviados a recicladores o a sitios específicos para su procesamiento para disminuir su peligrosidad (por ejemplo: con tratamientos físicos, químicos, biológicos, desde el molido y el granulamiento, pasando por la compactación hasta la incineración) y posteriormente realizar su disposición final (desde relleno sanitario al encapsulado para confinarlo en instalaciones ad-hoc).

vii) *Manejo de residuos y desechos para destrucción y disposición final*

viii) *Manejo de materiales reciclados sustitutivos que reducen el uso de materiales vírgenes*, que implica innovaciones en diseño de productos, nuevas estrategias de “sourcing” y desarrollo de proveedores, así como una reingeniería de la logística de aprovisionamiento.

La Logística Verde no es un capricho; existen por lo menos tres vectores para su impulso:

- *Consideraciones de costo beneficio*: productos mejores con costo de producción más bajo, recuperación del valor de envases, empaques, embalajes y unidades de manejo reciclables.
- *Requerimientos legales*: derivados de la protección a la salud y del ambiente, de consideraciones por costos de procesamiento de residuos, etc.
- *Responsabilidad social*: generalmente impulsado por organizaciones no gubernamentales y asociaciones de consumidores que apoyados en su poder de compra buscan productos más seguros y ambientalmente amigables; obviamente las firmas nunca pierden dinero, detrás hay un posicionamiento mercadotécnico en un segmento premium orgulloso de consumir de manera correcta.

La utilización en envases, empaques y embalajes de materiales reciclados y reciclables es la mejor estrategia para la gestión de los desechos domésticos; es la manera de reducir al máximo la utilización de insumos vírgenes, y de generar la menor cantidad de residuos.

Caso 11

Diversos fabricantes de productos de consumo masivo no duradero envasados en PET liderados por FEMSA Coca Cola han promovido la creación de ECOCE para el reciclado de estos envases. La planta de procesamiento aún trabaja a menos de un tercio de su capacidad por las deficiencias en los sistemas de logística inversa, ante esto Martínez (2006) afirma: “no todos los puntos de venta tienen disponibles contenedores para que los consumidores dispongan los envases vacíos, tampoco existen compactadoras en los sitios donde se esperaría mayor carga del producto a reciclar, y tampoco existen vehículos con las máquinas que pre-procesen los envases en el período de transporte; sin embargo, lo más grave es la escasa conciencia ecológica de los consumidores. Cada vez más el territorio metropolitano se transforma en un gigantesco basurero al aire libre de botellas de PET utilizadas en los refrescos, cada vez más en el drenaje de la ciudad se observan mas obstrucciones derivadas de las botellas de PET, cada vez más las estaciones de transferencia de residuos reciben más productos de PET y cada vez está más cerca un grave accidente de emisión de compuestos clorados a la atmósfera derivado de la posible quema de botellas de PET, que si ocurre en época de lluvias conduciría a una lluvia ácida masiva letal para las escasas zonas boscosas que restan en el Valle de México”

Finalmente es necesario señalar aspectos que se están volviendo importantes, en particular:

- *Gestión de rechazos en comercio electrónico*: conforme se extiende el comercio electrónico y su modelo de negocios que garantiza completa satisfacción o devolución del dinero, existirán más retornos por rechazo si los B2C/B2B (business-to-consumer/ business-

to-business) no son más selectivos en la formulación del catálogo y exigentes en la certificación de proveedores.

- *Gestión de producto caducado*: las dificultades para realizar dos reposiciones en una misma jornada pueden empujar producto sobre anaqueles (si hay lugar, como ocurre en mayor medida en los supermercados en las ciudades latinoamericanas que en las europeas) más allá de la demanda del mercado, y si las normas de caducidad se vigilan efectivamente, podría existir un transporte de retorno que no siempre puede operarse sobre los vehículos de entrega.

Tendencia 5:

Introducción de innovaciones de tecnología de la información en logística

En logística de distribución urbana metropolitana de mercancías las innovaciones en tecnología de información (TI) son rápidamente adoptadas por el impulso de las prácticas que inducen los supermercados (cuyas ventas ya significan más del 30% de las ventas detallistas en una ciudad). Entre las innovaciones en TI que serán cada vez más banalizadas en las operaciones logísticas de las empresas pueden citarse:

- Radiofrecuencia para la recepción de mercancía y gestión de inventarios en anaqueles.
- Software transaccional para resurtido automático y pedidos especiales, y para la comunicación del estatus de pedidos.
- GPS en vehículos, computadora a bordo y gestión de la entrega.
- Y próximamente, SKU en chip para agilizar el paso por cajas registradoras.

Caso 12: Hace poco menos de cinco años que los proveedores estrella –BIMBO, FEMSA, SABRITAS, NESTLE- de WalMart disponen de información de cada uno de los puntos de venta en cada una de las tiendas. Esto permite dividir el “mix” según segmentos territoriales del mercado, y rediseñar la cadena de suministros –resurtidos automáticos, parciales, compensatorios, emergencias, etc.- acorde con los ritmos –“pull”- de cada punto en la geografía metropolitana.

Caso 13: La gestión de acuses de recibo de las entregas de UPS se realiza en el área metropolitana de la ciudad de México con firma digitalizada, desde la misma oportunidad en que el sistema fue instalado para todas las operaciones en Norteamérica.

Entre las innovaciones en TI que están ganando terreno en la gestión de las autoridades municipales de la demanda de flujos de carga sobre la estructura vial destacan:

- *Gestión de estacionamientos transitorios en la vía pública para operaciones de carga y descargas* con cobranza mediante telepeaje e información de disponibilidad mediante señalización con paneles de leyenda variable, también disponible sobre sitio web de la autoridad municipal y/o de la comunidad metropolitana (accesible para el Departamento de

Gestión de Tráfico del operador logístico, e incluso para el chofer si dispone de computadora a bordo con internet satelital).

- *Sistemas de ayuda a la gestión de rutas de distribución de operadores logísticos y empresas*, mediante información municipal en tiempo real sobre la situación del tráfico y la congestión producida, con cámaras de video, algoritmos de reconocimiento de patrones para el cálculo de aforos, y modelos de asignación de flujos sobre la red, con resultados de estimación de flujo y congestión, disponibles sobre sitio web de la autoridad municipal y/o de la comunidad metropolitana (también accesible para el Departamento de Gestión de Tráfico del operador logístico, e incluso para el chofer si dispone de computadora a bordo con internet satelital).

Tendencia 6:

Innovaciones en la tecnología de vehículos

La distribución urbana metropolitana de mercancías es cada vez más exigente de innovaciones tecnológicas en los vehículos utilizados. Las tendencias globales señalan que los diferentes componentes para el vehículo objetivo son:

- “Van” con puertas corredizas a ambos lados y compuerta trasera, piso bajo, techo alto que permita el desplazamiento del operador de pie desde la cabina de conducción.
- Motores híbridos diesel turbocargado/eléctrico.
- Vehículos eléctricos para distribución física en Centros Históricos y áreas peatonales.
- Innovación en chasis con materiales “composite” para bajar tara y aumentar la capacidad de carga útil.
- Aseguramiento de cadenas de frío para la distribución física de productos agroalimentarios.
- Equipamiento con navegador GPS y computadora a bordo.

Caso 14

Las operaciones de distribución física metropolitana con los nuevos “freigthliners” para carga urbana utilizados por RYDER como operador logístico de JUMEX, las nuevas “van” Mercedes Benz diesel utilizadas por FEDEX y DHL, y los equipos de refrigeración innovadores italianos introducidos por TRANSPORTE Y DISTRIBUCION en la flota dedicada para los Restaurantes VIPs, son ejemplos emblemáticos de la reciente introducción de vehículos con nuevas tecnologías en la Zona Metropolitana del Valle de México.

Tendencia 7:

Externalización de operaciones mediante operadores logísticos con flotas dedicadas

La externalización de operaciones en procesos logísticos mediante operadores logísticos es una tendencia irreversible (Antún y Briceño, 1995). Es importante señalar que, según el Instituto Mexicano de la Competitividad, mientras que en Brasil el nivel de externalización de operaciones alcanza más del 35% y en Argentina, un 30%, en México aún no se externalizan más del 23%.

Con base en una extensa investigación anterior (Antún et al., 2006) basada en Estudio de Casos, puede afirmarse que:

1) Las *causas* que promueven la externalización de operaciones con Operadores Logísticos son: el aumento de facturación en un ambiente altamente competitivo y necesidad de concentrarse en el “core business”, la ampliación de la cobertura geográfica del mercado atendido y exigencia de homogeneidad en el nivel de servicio, la mejora continua del servicio al cliente, la reducción del ciclo de vida del producto, el desarrollo de nuevas formas de distribución en puntos de venta, la diversificación del “mix” ofertado y segmentación para diferentes nichos de mercado, la ampliación de la oferta con productos de terceros con la marca propia, y la realización de televentas y la necesidad de una distribución física capilar.

2) Los *pretextos* subyacentes en la decisión empresarial de externalizar son: evitar altas inversiones periféricas al “core business”, transparentar costos logísticos, ganar economías de competencia, disponer herramientas teleinformáticas sofisticadas para la gestión de los procesos logísticos, facilitar el acceso a innovaciones tecnológicas en logística para ganar competitividad, y utilizar la logística como estrategia extrema para agregar valor (Ayala y Sekiguchi, 1997).

3) Las *estrategias* para implantar la tercerización son muy variadas, e incluyen alternativas tales como: externalizar el departamento logístico interno, contratar servicios logísticos de terceros, establecer alianzas estratégicas con operadores logísticos 3PL (“third party logistics partner”), participar en proyectos de “benchmarking” logístico con consultoras externas, y comprar servicios de consultoras especializadas como 4PL (marca registrada de ACCENTURE).

4) Los *resultados* que las empresas revelan haber obtenido después de tercerizar las operaciones logísticas son: mejora en la rentabilidad de activos disponibles, mejora en la gestión del sistema logístico, posibilita la focalización de los recursos en el “core business”, aprovecha el “know how” de los especialistas, mejora la productividad, clarifica los costos logísticos, y disminuye el riesgo en la selección de localizaciones de soportes logísticos.

Las empresas líderes en la producción de productos de consumo masivo cada vez más externalizan sus operaciones logísticas (Ayala y Sekiguchi, 1997), y las tendencias indican que se busca desarrollar operadores logísticos (OL) especializados que dispongan (con medios propios y/o de terceros) de: CEDIS parcialmente dedicados para realizar entregas centralizadas (Harris, 1987; McKinnon y Woodburn, 1994; Jorgensen, 1995; Antún, et al., 1997), flotas dedicadas con vehículos con servicio a la carga customizado (temperatura y atmósfera controlada, unidad de carga que permite procesar pedidos fuera de preventa, etc.) (Quarmby, 1989), y desarrollo de Microplataformas Logísticas Urbanas (mPLU) para “cross-docking” y/o redistribución con vehículos más pequeños y adaptados, y/o diablitos.

Caso 15

RYDER integró en renta, a una flota propia dedicada para distribución metropolitana de JUMEX, algunos vehículos que habían sido adquiridos por JUMEX antes de la decisión corporativa de externalizar estas operaciones. TRANSPORTE Y DISTRIBUCION con exitosos servicios dedicados a NESTLE en el Área Metropolitana de la Ciudad de México, recientemente afronta el desafío de la distribución en las principales ciudades del país.

Tendencia 8:

Preferencia para la localización de soportes logísticos corporativos propios y/o de operadores logísticos con operación dedicada en centros logísticos

Una de las tendencias globales de mayor interés para el diseño de políticas públicas para la gestión de los flujos de vehículos de la demanda de transporte de carga metropolitano, es la preferencia empresarial de establecer y/o buscar soportes logísticos de plataforma, es decir preferir la localización de la infraestructura propia o de operadores logísticos para la logística de la distribución física en Centros Logísticos (CL) o Parques Logísticos (Antún, et al., 2006; Antún et al., 2008).

Si bien toda ruptura, ya sea de la unidad de carga o de la tracción, implica costos, la operación con base en CL permite a las empresas una gestión de: i) las restricciones derivadas de los reglamentos municipales, y ii) enfocarse a una distribución física urbana lo más cercana a la centralizada para evitar los costos de las entregas con paradas múltiples:

- Una arquitectura logística con Soportes Logísticos Corporativos (SLC) en CL facilita a las empresas la gestión de flujos extrametropolitanos que se realizan con unidades de carga grandes (trailers, “fulles”, etc) mediante “cross-docking” y el diseño de rutas que atiendan un número reducido de puntos de venta relativamente contiguos aproximando la gestión de entregas a la manera centralizada (Antún y Lozano, 2000).

Caso 16: La operación de EXEL Logistics, actualmente una filial de DHL, está prefiriendo instalaciones en San Martín Obispo en el norte de la Zona Metropolitana del Valle de México. Otra filial de DHL, Kuehne + Nagel, ha instalado sus operaciones dedicadas de gestión de inventario y procesamiento de pedidos para los laboratorios farmacéuticos líderes en el Parque Industrial FINSA cercano a Xochimilco, una localización al sur de la metrópoli, muy adecuada para transferir el almacén de productos terminado de las plantas de producción en la Colonia del Valle.

- El uso de Microplataformas Logísticas Urbanas (mPLU) para la entrega en Centros Históricos y en áreas urbanas conflictivas permite una operación rentable (por el tamaño de la unidad de carga para el recorrido troncal) y eficiente (ya sea con unidades eléctricas o con diablitos se pueden alcanzar de manera razonable y más segura y confiable los puntos de entrega).

Caso 17: Para la distribución física de productos de consumo masivo de alta rotación FEMSA Coca Cola, SABRITAS incorporaron vehículos eléctricos y Microplataformas Logísticas Urbanas. Un estudio pasado propuso una mPLU para el sector de la industria del vestido que fue recibido con interés por los empresarios (Antún et al., 2002b).

2. POLÍTICAS PÚBLICAS VINCULADAS A LAS TENDENCIAS CORPORATIVAS

a. Políticas públicas en Centros Logísticos y Ordenamiento Territorial Logístico

El Grupo de Investigaciones en Ingeniería de Transporte y Logística (GiiTRAL) del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), que ganara el Premio Nacional de Logística como Mejor Centro Académico de Investigación Aplicada en Logística otorgado por el Consejo Mexicano de Logística, concluyó un estudio realizado para PROLOGYCA (Programa de Competitividad Logística y de Centrales de Abasto) de la Secretaría de Economía del Gobierno Federal de México, y FIDCENTRO (Fideicomiso para el Desarrollo de la Región Centro de México), sobre *Estrategias para el Ordenamiento Territorial Logístico Competitivo de la Región Centro de México* (Antún, et al., 2009). Este Estudio definió bases para políticas públicas para la promoción de Centros Logísticos en el área metropolitana integrada por la Zona Metropolitana del Valle de México, las metrópolis regionales de Toluca (capital del Estado de México), Pachuca (capital del Estado de Hidalgo), Tlaxcala (capital del Estado de Tlaxcala), Puebla (capital del Estado de Puebla) y Cuernavaca (capital del estado de Morelos), en particular ante el impacto logístico de la finalización de las obras del nuevo Arco Norte (un nuevo anillo de autopista de altas especificaciones con cuatro carriles que rodea la ciudad de México a 80 km del centro), el Circuito Mexiquense (una nueva autopista de altas especificaciones que permite una penetración desde la Autopista Laredo /USA-México a la altura de Huehuetoca hacia el poniente del Área Metropolitana de la Ciudad de México, sobre el Centro de Carga Aérea del Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México) y la autopista Mexico-Texcoco, y un conjunto de nuevas autopistas regionales (en Puebla: Amozoc-Perote, en Morelos: Cuautla-Cuernavaca; en Tlaxcala el Circuito Bicentenerio; en Hidalgo, el enlace Huehuetoca-Atitalaquia).

Actualmente existe un conjunto de proyectos de nuevos Centros Logísticos promovidos por las entidades federativas en Jilotepec (Estado de México), Tizayuca y Atitalaquia (Estado de Hidalgo), Oriental (Estado de Puebla) y Cuautla (Estado de Morelos).

Por otro lado, los desarrolladores inmobiliarios privados en el sector logístico, están consolidando una amplia y diversificada oferta de infraestructura y naves logísticas customizadas ofrecidas en alquiler, en localizaciones premium en nuevos Parques Logísticos como San Martín Obispo II (Estado de México), en parques industriales existentes reciclados a Parques Logísticos como Tepeji del Río (Estado de Hidalgo), en nuevos “clusters” como Huehuetoca (conurbando Estados de México e Hidalgo) y sobre el Circuito Mexiquense

(Estado de México), y desarrollando proyectos sobre el nuevo Arco Norte como en Jilotepec (Estado de México) y San Martín Texmelucan (Estado de Puebla).

Caso 18: LIVERPOOL inauguró en 2006 un nuevo centro de distribución (CEDIS) para el subconjunto de “big ticket” en Huehuetoca, y pocos meses después, en vecindad, y sobre las líneas férreas del Kansas City Southern y de FERROMEX, MABE inauguró en abril 2008 su nuevo Centro de Distribución; MICHELIN inauguró el CEDIS mas importante en América en febrero 2009, en San Martín Obispo, y aquí mismo SAMSONITE. Todas las cadenas de supermercados líderes inauguraron recientemente nuevos CEDIS: Walmart en San Martín Obispo (2007), CHEDRAUI sobre el nuevo Circuito Mexiquense (2008), y COSTCO en Tepeji del Río (2009).

Por otro lado, es de señalar la ausencia de políticas públicas del Gobierno de la Ciudad de México para establecer una red de Centros de Carga de Pedidos (CCP) y Microplataformas Logísticas que son básicas para la distribución urbana de mercancías. Se estima entre 20 a 25 las localizaciones necesarias para CCP en el tejido urbano y cinco para Microplataformas Logísticas (en el Complejo de Mercados Tradicionales en La Merced, en el Centro Histórico de la Ciudad de México, y en los Centros Históricos de Coyoacán, San Angel y Tlalpan) (Antún, et al., 2002a; Antún et al., 2003).

b. Políticas públicas en Gestión de la Vialidad Primaria

Las políticas públicas en Gestión de la Vialidad Primaria se restringen a la prohibición de la circulación de los camiones de carga -no circulan en el Periférico (ambos niveles), ni en el Viaducto, ni en el Corredor Cero Emisiones (tramo céntrico del Eje Vial Central Lazaro Cardenas)-, y no se promulgaron las propuestas (Lozano et al., 2006) para definir una Red de Corredores Urbano Metropolitanos de Transporte de Carga, lo cual hubiera implicado una reingeniería de la geometría de carriles y para el giro en intersecciones clave, así como una modificación de los tiempos de ciclo en las intersecciones semaforizadas.

Tampoco se realiza una gestión de la vialidad para el transporte de materiales peligrosos, a pesar de los numerosos accidentes. Cabe destacar que existe una gestión horaria de la vialidad en el Centro Histórico, en particular en las áreas parcialmente peatonizadas (Antún, 2010).

c. Políticas Públicas en Asignación de Áreas de Carga y Descarga en la vía pública

Lamentablemente tampoco existe una política pública de Asignación y de Gestión de Áreas de Carga y Descarga en la Vía Pública. Aún se dejan al azar las operaciones de carga y descarga que cada vez más se realizan estacionando los vehículos de carga urbana en doble fila.

Tampoco existe una franquicia de estacionamiento transitorio (máximo 30 minutos) en los cajones de estacionamiento gestionados por parquímetros.

d. Políticas Públicas en la Promoción de la Innovación en Vehículos

Los vehículos de distribución urbana “full” eléctricos gozan de libertad de circulación en el Centro Histórico, y en los Centros Históricos de Coyoacán y Tlalpan. Sin embargo, no existen postes de recarga eléctrica para estos vehículos, que deberían estar disponibles con pago por tarjeta.

Cabe señalar que existe una promoción fiscal a los vehículos “full” eléctricos e híbridos.

No existe ningún fondo para promover el desarrollo tecnológico de vehículos especializados en distribución urbana de mercancías.

3. CONCLUSION

Los procesos logísticos en distribución urbana-metropolitana están en constante cambio, tanto en el soporte tecnológico como en la realización técnica de los procesos mismos y en el “management” de éstos. Es necesario monitorear los cambios sustantivos reseñados en la distribución física urbano-metropolitana de mercancías, porque contribuyen a un mejor posicionamiento competitivo de las empresas en el mercado, y también, a un mejor desarrollo de la vida de la ciudad; se trata de una tarea científica y técnica profesional que contribuye, por su impacto de “benchmarking” (Antún, 2015), al mejoramiento de las prácticas de la ingeniería en la comunidad profesional de ejecutivos en logística y cadenas de suministro. Es deseable que en las áreas metropolitanas latinoamericanas se promueva un *Observatorio de Mejores Prácticas Logísticas en Distribución Urbana de Mercancías*, con la participación de las empresas y centros académicos de investigación aplicada en logística.

REFERENCIAS

- ANTÚN, J.P. Y BRICEÑO, S. (1995). *Operadores Logísticos en México: revisión de sus prácticas y estrategias de desarrollo*, Memorias del IX Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, La Habana, Cuba (en CD-ROM).
- ANTUN, J.P., MALLORQUIN, M. TOLEDO, I. Y BRICEÑO, S. (1997). *Opérateurs logistiques dans la distribution métropolitaine de marchandises: une stratégie de diminution des émissions à Mexico*. Actes du 4eme Colloque Scientifique International Transport et Pollution de l’Air, Avignon, France, juin 9-13, Rapport LEN No. 9718, INRETS, Lyon-Bron, pp. 321-328.
- ANTÚN, J.P. Y LOZANO, A (2000). *Soportes Logísticos de Plataforma: una estrategia para el ordenamiento territorial logístico de la Zona Metropolitana del Valle de México*, Engenharia de Tráfego e Transportes 2000: Avancos para uma era de mudancas, Memorias del XI Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, Gramados, Brasil, Noviembre 19-23, 2000. pp. 679-692.
- ANTÚN, J.P., HERNANDEZ, R. Y LOZANO, A. (2002a). *Microplataformas Logísticas Urbanas para la distribución de mercancías en el Centro Histórico de la Ciudad de México*. Actas del XII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte; Quito, Ecuador, noviembre 18-22, 2002 (en CD ROM).

ANTÚN, J.P., HERNANDEZ, R. Y LOZANO, A. (2002b). *Diez estrategias para la gestión del transporte de carga en el Centro Histórico de la Ciudad de México*. Memorias del IV Congreso de Ingeniería de Transporte (IV CIT 2002); Santander, España, Junio 11-13, 2002; Vol 2; pp: 875-884.

ANTÚN, J.P., HERNANDEZ, R. Y LOZANO, A. (2003). *Gestión de la demanda de transporte de carga urbana: Proyecto de Microplataforma Logística Urbana en el Centro Histórico de la Ciudad de México para la industria de la confección textil*. Memorias del XII Congreso Latinoamericano de Transporte Público y Urbano (CLATPU) Transporte sostenible y seguro: el reto en el nuevo milenio, Bogotá, Colombia, octubre 27-31, 2003.

ANTÚN, J.P., LOZANO, A., HERNÁNDEZ, R. Y ALARCÓN, R. (2006). *Proyecto de desarrollo de Soportes Logísticos de Plataforma (SLP) para la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM)*". Tarea 5 en LOZANO, A ET AL (2006) *Programa Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México (PMTCA-VM): Estrategias para la disminución del impacto ambiental del transporte de carga en la Zona Metropolitana del Valle de México*, Instituto de Ingeniería, UNAM, y Comisión Ambiental Metropolitana, México DF.

ANTÚN J.P., LOZANO A., HERNÁNDEZ, R., ALARCÓN R. Y MUÑOZ, M. (2008). *Centros logísticos*. Serie de Estudios y Proyectos SD/50, Instituto de Ingeniería, UNAM. Pp. 200. Abril 2008. ISBN: 970-32-0710-3, ISBN: 978-607-2-00042-1.

ANTÚN, J.P., LOZANO, A., MAGALLANES, R., ALARCÓN, R. Y GRANADOS, F. (2009). *Estrategias para el ordenamiento territorial logístico competitivo de la Región Centro*. Instituto de Ingeniería, UNAM; realizado para Programa de Competitividad en Logística y Centrales de Abasto (PROLOGYCA) de la Secretaría de Economía, Gobierno Federal, y Fideicomiso para el Desarrollo de la Región Centro País (FIDCENTRO), México DF.

ANTUN, J.P. (2010). *Urban Logistics Practices. Case Study: Public policies for urban logistics in the Mexico City Metropolitan Area*, TURBLOG_WW
http://89.152.245.33/DotNetNuke/Portals/Turblog/DocumentosPublicos/CaseStudies/TURBLOG_D3.4MexicoFV.pdf

ANTÚN J.P. Y ALARCÓN R. (2015). *Estrategias para el mejoramiento de la logística de distribución de mercancías en el Núcleo de Mercados de La Merced*, realizado por convenio con la Secretaría de Desarrollo Económico (SEDECO) del Gobierno de la Ciudad de México, Grupo de Investigaciones en Ingeniería de Transporte y Logística (GiITRAL), Instituto de Ingeniería, UNAM, México.

ANTÚN J.P. (2015). *Benchmarking de procesos logísticos en distribución urbana de mercancías*. Proyecto presentado a la Asociación Nacional de Transporte Privado (ANTP), México.

AYALA, M. Y SEKIGUCHI, M.T. (1997). *Operadores Logísticos: una estrategia extrema para agregar valor*. Tesis de Maestría en Administración de Empresas, Director de Tesis: JP Antún, División de Posgrado, Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM), 13 diciembre 1997, Mejor tesis ITAM 1997-98.

GALVÁN, D. (2004). *Modelización de e-Logistics: Distribución Business to Consumer*

- (B2C) de la alimentación en la ciudad de Barcelona. Tesis de Doctorado en Ingeniería, ESECCP, Universitat Politècnica de Barcelona, Barcelona.
- HARRIS, D. (1987). *Central vs direct delivery for large retail food outlets*. Working paper 8703, Institute of Retail Studies, University of Stirling (UK).
- JORGENSEN, K. (1995). *Grocery distribution, land use and sustainable transport*”, *Proceeding of the 23rd PRTC European Transport Forum*. University of Warwick (UK), September 11-15.
- LOZANO A., ANTÚN J.P., GRANADOS F., TORRES V., HERNÁNDEZ R., GUZMÁN A., ALARCÓN R., VARGAS F. Y GUARNEROS L. (2006). *Programa Metropolitano de Transporte de Carga y Medio Ambiente para el Valle de México. Fase 1: Estrategias para la disminución del impacto ambiental del transporte de carga en la Zona Metropolitana del Valle de México*. Comisión Ambiental Metropolitana (CAM) e Instituto de Ingeniería, UNAM, México.
- MARTINEZ H. M. (2006). *Fundamentos de la Educación Ambiental*. <http://www.unescoeh.org>.
- MCKINNON, A. Y WOODBURN, A. (1994). *The consolidation of retail deliveries: its effects on CO2 emissions*. *Transport Policy*, Vol. 1, No. 2, pp. 125-136.
- OMWANDO, H.K. (2004). *Europe's E-commerce: The Next Five Years*. Forrester Research; Sunnyvalley Ca
- QUARMBY, D. (1989). *Developments in the retail market and their effect on freight distribution*. *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol. 23, No. 1.
- TANIGUCHI, E; THOMPSON, R. Y YANADA, T. (2014). *City Logistics*. *Procedia - Social and Behavioral Sciences (SBSPRO 20573)*.

20 Aplicación del modelo VRP (Vehicle Routing Problem) para la optimización de una red de distribución

Fredy Sánchez Hernández

Esther Segura Pérez

UNAM, Facultad de Ingeniería, México

RESUMEN

En la actualidad las empresas que toman decisiones relacionadas con el Diseño de Redes de Distribución (DRD) las llevan a cabo de manera empírica, debido a esto se presentan errores en su desarrollo, en donde el principal afectado es el cliente. Por ello, el eje principal para lograr una ventaja competitiva es la determinación del plan de rutas a seguir para mover los productos desde el centro de producción-distribución o CEDI a los clientes o consumidores. Una revisión de la literatura indica que los problemas relacionados con el DRD involucran varias decisiones a ser optimizadas: localización, asignación, ruteo e inventarios.

Este proyecto se basa en un caso de estudio real de complejidad media, y el objetivo es optimizar el ruteo de una red distribución de vino de una pequeña empresa que opera al norte de la Ciudad de México (CDMX) aplicando el algoritmo de ahorros al modelo del VRP (“Vehicle Routing Problem”). Se realiza un análisis comparativo con el “software” de ruteo Grafos-v. 1.3.5 (2016). Los resultados muestran ahorros del 17% de los costos, un aprovechamiento máximo de la flota de vehículos, se logra un tiempo de ejecución mínimo y un aumento en la satisfacción del cliente ya que el cumplimiento de la demanda se lleva a cabo en una sola visita.

Palabras clave: VRP, Clarke y Wright, redes de distribución.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente las pequeño, micro y medianas empresas llevan a cabo el diseño de sus rutas de manera empírica (Kirby y Brosa, 2011). Lo cual implica altos costos de operación que se ven reflejados en los clientes (Anaya, 2007). Por ello es necesario apoyar a las empresas en la optimización de sus rutas mediante la aplicación de algoritmos que se adecúen a su problemática específica o bien mediante una modelación matemática propia. En especial en este artículo se aplica el algoritmo de Clarke y Wright (1964) (algoritmo de ahorros) al modelo VRP con flota homogénea y demanda determinística.

El algoritmo de Clarke y Wright ha sido utilizado en distintas aplicaciones reales, por ejemplo, el artículo “The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems”, expone aplicaciones reales y “software” comercial que han tomado como base

el método de ahorros (Rand, 2009).

El método de ahorros ha ido desarrollándose en el día a día, incluso se puede hacer una comparación con métodos exactos y demostrar que se pueden obtener resultados cercanos al óptimo. Un ejemplo que se explica claramente en el trabajo de tesis de Benito (2015), indica que el algoritmo de ahorros proporciona mejores soluciones en tiempos de ejecución adecuados comparado con métodos exactos. De acuerdo con lo anterior se puede tomar como base el algoritmo de ahorros para cerrar las brechas que tienen algunos empresarios, algunas de las cuestiones que plantean son las siguientes:

- ¿Cuál es el orden en que se debe visitar a los clientes de tal manera que no impacte en los costos de transporte?
- ¿Qué tipo de camión conviene usar para cubrir la demanda del cliente?
- ¿Cuántas rutas serán necesarias para cubrir la demanda del cliente?

Las preguntas anteriores indican como primera necesidad, cubrir el ruteo de la empresa, y basta con utilizar el algoritmo de ahorros para resolver dichas inquietudes (Benito, 2015).

En este trabajo se identifica que el algoritmo de ahorros proporciona una solución de ruteo eficiente. El trabajo se divide de la siguiente manera: en la sección de análisis de la situación actual se lleva a cabo el planteamiento del problema, posteriormente se describe la metodología de solución, análisis de resultados, cotejo de los resultados del algoritmo de Clarke y Wright con el “software” de ruteo Grafos V. 1.3.5 (Grafos, 2016), y por último se plantean las conclusiones.

2. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

2.1 Descripción de la empresa

Este artículo se enfoca a una empresa dedicada a la distribución de licores. Sus oficinas, CEDI (Centro de Distribución), planta, y andén se encuentran ubicados al Norte de la Ciudad de México, para este trabajo se tomarán 16 destinos que corresponden a las delegaciones de la CDMX. La CDMX es uno de los puntos con alta demanda para la empresa.

2.2 Descripción del problema

De acuerdo con la Figura 1, la empresa requiere un análisis del problema de ruteo vehicular, modificar su red de distribución actual y obtener una adecuada planificación lo cual significa minimizar los costos de transporte, considerando la demanda de los clientes y respetando la capacidad de los vehículos.

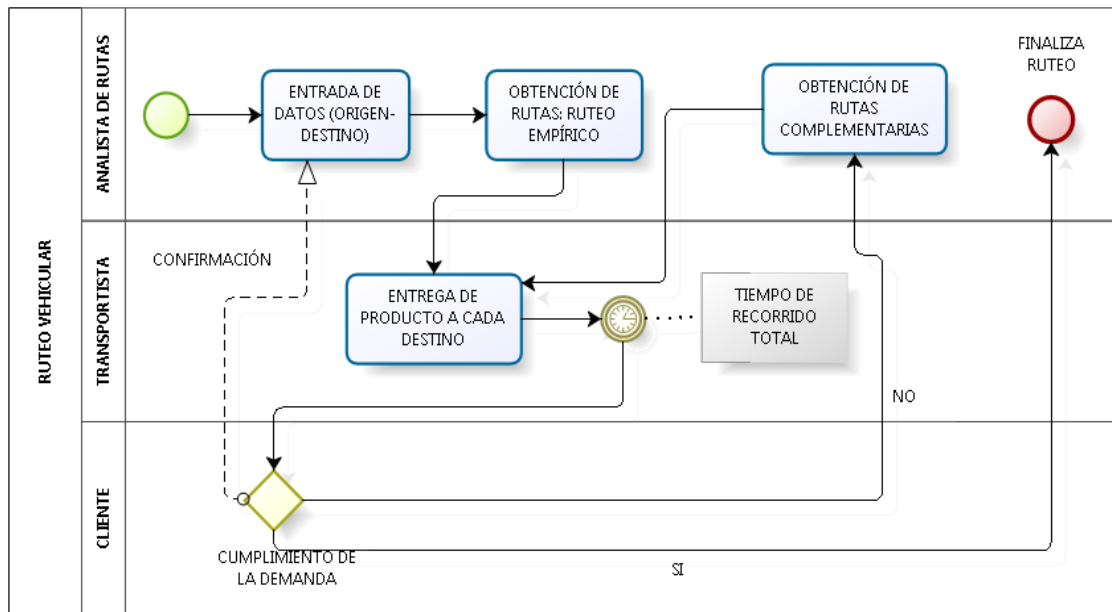


Figura 1. Problema de ruteo de la empresa

Tabla 1. Datos para análisis de ruteo

| | |
|------------------------|--|
| Flota | 3 camiones rabón (1 eje) |
| Capacidad de flota | 8 toneladas/camión |
| Tiempo de distribución | 6:00 am – 17:00 pm |
| CEDI | 1 |
| Cliente (C_{ij}) | $C_{11}, C_{12}, C_{13}, \dots, C_{1n} \quad \forall n = 1, 2, 3, \dots, 16$ |
| Demanda (D_{ij}) | $D_1 = 60, D_2 = 80, D_3 = 120, D_4 = 160, D_5 = 100,$ $D_6 = 120, D_7 = 100, D_8 = 80, D_9 = 80, D_{10} = 200,$ $D_{11} = 60, D_{12} = 40, D_{13} = 120, D_{14} = 100,$ $D_{15} = 160, D_{16} = 80$ (Unidades = Cajas) Cada caja contiene 12 botellas de 750 ml |

3. METODOLOGÍA

Para resolver el problema se propuso una metodología de cuatro pasos: recolección de datos, propuesta de modelación matemática, descripción y aplicación del algoritmo de ahorros y finalmente el análisis de resultados, el cual incluye la validación de resultados arrojados por el algoritmo mediante la ejecución en el “software” Grafos v1.3.5 y finalmente la comparación con la situación actual.

3.1 Recolección de datos

En la Tabla 1 se describe el problema de ruteo que pertenece a un VRP (“Vehicle Routing Problem” por sus siglas en inglés) es decir, es un problema de ruteo vehicular en especial con flota homogénea.

3.2 Modelo Matemático del VRP

De acuerdo con Laporte (2007), cuando la matriz es simétrica $C_{ij} = C_{ji} \forall i, j$, es común definir que el problema es un grafo no dirigido $G = (V, E)$.

Dónde:

$V = \{v_0, v_1, v_2, \dots, v_n\}$ es el conjunto de vértices v_i $1 \leq i \leq n$, que representan los clientes y v_0 representa el CEDI.

Además, cada cliente tiene una demanda q_i a satisfacer por el CEDI.

$E = \{(v_i, v_j) | v_i, v_j \in V \forall i \neq j\}$, representa el conjunto de arcos, donde cada arco tiene asociado un costo de transporte C_{ij} de v_i a v_j .

El problema consiste en determinar un conjunto de n rutas de vehículos, donde:

- Las rutas que utilizan los choferes son las mismas de ida y vuelta
- Las rutas inician y finalizan en el depósito
- Cada cliente recibe la visita de exactamente un vehículo,
- La demanda total de cualquier recorrido no supere “ d_i ”, y
- El costo total de ruteo sea mínimo

El objetivo del VRP es obtener una configuración con la mínima cantidad satisfaciendo las demandas de todos los clientes. Para ello se debe determinar un conjunto R de rutas de costo mínimo que inicien y terminen en el CEDI, donde cada vértice $v_i \in V - \{v_0\}$ es visitado solo una vez.

La variable X_{ij} es una variable binaria que indica si el vehículo viaja directamente del origen i al destino j , y toma los siguientes valores:

- 1, si el arco (i, j) es visitado por el vehículo k
- 0, caso opuesto
- El modelo matemático corresponde a una extensión del problema m -TSP (múltiples agentes viajeros), a continuación, se muestra el modelo que es una formulación dada por Miller, Tucker y Zemlin (1960) expuesta en Novelle et al. (2009).

$$\min Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n C_{ij} X_{ij} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{j \in V} X_{0j} = m \quad (2)$$

$$\sum_{i \in V} X_{i0} = m \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$X_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in E \quad (6)$$

$$\sum_{i \in S, j \in C} C_{ij} X_{ij} \geq r(s) \quad S \in V \quad (7)$$

$$r(s) = \min \sum_{k \in K} Y_k \quad (8)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i \in S} d_i X_{ik} \leq CY_k \quad \forall k \in K \quad (9)$$

$$\sum_{k \in K} X_{ik} = 1 \quad \forall i \in S \quad (10)$$

$$X_{ij} = \{0, 1\} \quad \forall i \in S, \forall k \in K \quad (11)$$

$$Y_k = \{0, 1\} \quad \forall k \in K \quad (12)$$

- La Ecuación 1 representa la función objetivo que minimiza el costo de transporte.
- Las Ecuaciones 2 y 3 indican que a lo más se utilizarán m vehículos en la solución y que cada vehículo que abandona el CEDI debe regresar.
- Las Ecuaciones 4 y 5 establecen que los clientes deben ser visitados exactamente una vez.
- La Ecuación 6 indica la restricción de capacidad.
- Las Ecuaciones 7 a 12 resuelven diferentes cuestiones, la primera es que la expresión $r(s)$ se utiliza para resolver la eliminación de “sub-tours” no factibles y a su vez para establecer las restricciones de carga de los vehículos.

También se asume que cada cliente i tiene asociada una demanda d_i , cuya asignación a los vehículos no debe exceder la capacidad C , representa al conjunto de clientes, donde:

$$d(S) = \sum_{i \in S} d_i \quad (13)$$

- $d(S)$ representa la demanda total del conjunto de clientes.
- $r(s)$ es la cantidad mínima de vehículos para servir a todos.
- K , representa a un conjunto con suficientes vehículos para satisfacer la demanda.

De acuerdo con el estudio de la literatura existen distintos métodos para resolver un VRP, entre los cuales destaca el algoritmo de Clarke y Wright, un algoritmo que ofrece una solución aceptable en un tiempo de cómputo razonable.

3.3 Algoritmo de ahorros (Savings Criterion – Clarke y Wright 1964)

El algoritmo de Clarke y Wright o de ahorros es una de las heurísticas del VRP más conocidas, es un algoritmo constructivo basado en la creación de rutas iniciales formadas por un único cliente y mezcla de éstas por medio del criterio de ahorro para reducir su número y aumentar la cantidad de clientes que se visiten en cada ruta (Novelle, 2009).

El algoritmo fue diseñado para un problema en el que se asume que existe un depósito central, con uno o varios vehículos de entrega y n destinos, cada uno con un requerimiento conocido previamente.

Se identifica el depósito (0), y los clientes en las localidades 1, 2,..., n , y además los costos de ir de un destino (i) a un destino (j) son conocidos.

Dónde:

- C_{i0} Costo de ir del nodo (i) al nodo (0)
- C_{0j} Costo de ir del nodo (0) al nodo (j)
- C_{ij} Costo de ir del nodo (i) al nodo (j)

$$R = C_{0i} + C_{i0} + C_{0j} + C_{j0} \quad (14)$$

$$N = C_{0i} + C_{ij} + C_{j0} \quad (15)$$

Para la Ecuación 14 se considera C_{0i} y C_{i0} iguales, por lo tanto, tienen la misma distancia, lo mismo ocurre con C_{0j} y C_{j0} . Es decir que el recorrido del CEDI al destino incluye dos viajes, el de ida y el de vuelta.

Entonces la Ecuación 14 queda de la siguiente manera:

$$R = 2(C_{0i} + C_{0j}) \quad (16)$$

Uniendo las Ecuaciones 15 y 16 se genera el ahorro (“saving”) por lo tanto queda expresado de la siguiente forma:

$$S_{ij} = 2(C_{0i} + C_{0j}) - (C_{0i} + C_{ij} + C_{0j}) \quad (17)$$

$$S_{ij} = 2C_{0i} + 2C_{0j} - C_{0i} - C_{ij} - C_{0j} \quad (18)$$

$$S_{ij} = C_{0i} + C_{0j} - C_{ij}, \forall i, j = 1, \dots, n \quad (19)$$

$$C_{0i} + C_{0j} - C_{ij} \geq 0 \quad (20)$$

- En la Ecuación 18 se tiene el ahorro para cualquier par de nodos.
- La desigualdad 19 indica el criterio para decidir si una nueva ruta formada por la combinación de dos rutas independientes es posible, de lo contrario se rechaza la unión, (Lysgaard, 1997).

3.4 Aplicación del algoritmo de Clarke y Wright

Para el desarrollo de la heurística de Clarke and Wright, se debe considerar lo siguiente:

- **Paso 1:** Obtención de la información

Se calculan las distancias entre cualquier par de puntos mediante la aplicación de *Google Maps*. La Tabla 2 muestra las distancias obtenidas entre el origen (0) y cada uno de los destinos ($\forall i=1, \dots, 16 \neq j=1, \dots, 16$).

Siguiendo con el algoritmo se determinan los costos $C_{ij} \forall i=1, \dots, 16, j=1, \dots, 16$

- **Paso 2:** Elaboración de una matriz de distancias

La matriz resultante es una matriz simétrica de 16 por 16, la cual servirá para obtener los ahorros potenciales como lo indica el algoritmo de Clarke and Wright.

- **Paso 3:** Determinación del costo de transporte entre cada par de nodos:

$$\text{Costo de Combustible} = \left(\frac{L}{\text{Km}} \right) * \left(\frac{\$ \text{comb}}{L} \right) \quad (21)$$

El rendimiento de combustible de un camión tipo rabón se determinó en 0.21l por kilómetro recorrido. Con base en los indicadores de productos petrolíferos publicados por PEMEX (PEMEX, 2016) se conoció que el precio del diésel para el mes de abril de 2016 fue de \$13.72. Así se obtiene un costo de 2.8812 pesos por cada kilómetro que recorre el camión. Al multiplicar la distancia recorrida por el costo de combustible por kilómetro recorrido, se obtiene una matriz de costos, de donde se obtiene la Tabla 3.

Tabla 2. Distancias origen-destino

| Origen | Destino | |
|-----------|---------|---------|
| | Km | t [min] |
| C_{01} | 35.433 | 36.333 |
| C_{02} | 25.200 | 33.667 |
| C_{03} | 28.600 | 28.000 |
| C_{04} | 40.800 | 43.333 |
| C_{05} | 46.600 | 47.000 |
| C_{06} | 51.567 | 51.667 |
| C_{07} | 37.600 | 40.000 |
| C_{08} | 46.933 | 47.667 |
| C_{09} | 46.350 | 42.000 |
| C_{010} | 56.867 | 57.000 |
| C_{011} | 43.100 | 45.000 |
| C_{012} | 51.800 | 54.500 |
| C_{013} | 49.800 | 49.000 |
| C_{014} | 67.033 | 70.000 |
| C_{015} | 62.533 | 66.000 |
| C_{016} | 87.000 | 92.333 |
| TOTAL | 777.217 | |

Tabla 3. Costos de ruteo para los 16 nodos del problema planteado

| Ruta | Nodos | Km | Costo (\$) |
|------|--------------|----------------|----------------|
| 1 | 0-1-0 | 70.86 | 204.162 |
| 2 | 0-2-0 | 50.40 | 145.212 |
| 3 | 0-3-0 | 57.20 | 164.805 |
| 4 | 0-4-0 | 81.60 | 235.106 |
| 5 | 0-5-0 | 93.20 | 268.528 |
| 6 | 0-6-0 | 103.14 | 297.167 |
| 7 | 0-7-0 | 75.20 | 216.666 |
| 8 | 0-8-0 | 93.86 | 270.429 |
| 9 | 0-9-0 | 92.70 | 267.087 |
| 10 | 0-10-0 | 113.74 | 327.708 |
| 11 | 0-11-0 | 86.20 | 248.359 |
| 12 | 0-12-0 | 103.6 | 298.492 |
| 13 | 0-13-0 | 99.60 | 286.968 |
| 14 | 0-14-0 | 134.06 | 386.254 |
| 15 | 0-15-0 | 125.06 | 360.323 |
| 16 | 0-16-0 | 174.00 | 501.329 |
| | Total | 1554.42 | 4478.59 |

- **Paso 4:** Cálculo de los ahorros potenciales para los 120 arcos de la matriz de costos. La Tabla 4 presenta los ahorros ordenados de mayor a menor.

El ahorro potencial del arco 1-2 se desarrolla a continuación:

$$S_{ij} = C_{0i} + C_{0j} - C_{ij}$$

$$i = 1$$

$$j = 2$$

$$C_{0i} = C_{01} = 102.081$$

$$C_{0j} = C_{02} = 72.606$$

$$C_{ij} = C_{12} = 33.047$$

$$S_{ij} = S_{12} = 102.081 + 72.606 - 33.047$$

$$S_{ij} = S_{12} = 141.64$$

El ahorro potencial del arco 14-16 se desarrolla a continuación:

$$i = 14$$

$$j = 16$$

$$C_{0i} = C_{014} = 193.13$$

$$C_{0j} = C_{016} = 250.66$$

$$C_{ij} = C_{1416} = 47.05$$

$$S_{ij} = S_{1416} = 193.13 + 250.66 - 47.05$$

$$S_{ij} = S_{1416} = 396.74$$

En la Tabla 5 se aprecian 5 rutas que cumplen con las restricciones de capacidad y costo de transporte por kilómetro (capacidad = 384 cajas, y costo de transporte = \$1,296.54), y en la Figura 2 están contenidas las rutas gráficas que se obtuvieron del algoritmo de Clarke y Wright.

Tabla 4. Ahorros generados mediante el algoritmo Clarke and Wright

| Arco | Ahorro | Arco | Ahorro |
|------|--------|-------|--------|
| 1-2 | 141.64 | 14-16 | 396.74 |
| 1-3 | 139.05 | 15-16 | 363.60 |
| 1-4 | 193.99 | 10-16 | 337.09 |
| 1-5 | 201.68 | 14-15 | 322.87 |
| 1-6 | 201.77 | 10-15 | 320.76 |
| 1-7 | 166.41 | 10-14 | 305.98 |
| 1-8 | 172.76 | 13-16 | 302.52 |
| 1-9 | 136.8 | 6-16 | 295.32 |
| 1-10 | 192.26 | 12-16 | 289.27 |

| Arco | Ahorro |
|------|--------|
| 1-11 | 167.2 |
| 1-12 | 167.2 |
| 1-13 | 148.95 |
| 1-14 | 194.08 |
| 1-15 | 188.52 |
| 1-16 | 212.14 |
| 2-3 | 127.15 |
| 2-4 | 162.3 |
| 2-5 | 160.39 |
| 2-6 | 157.71 |
| 2-7 | 140.23 |

| Arco | Ahorro |
|-------|--------|
| 13-14 | 287.92 |
| 11-16 | 282.93 |
| 6-14 | 282.36 |
| 6-10 | 281.17 |
| 6-15 | 280.05 |
| 12-14 | 278.91 |
| 11-14 | 277.75 |
| 8-16 | 275.32 |
| 5-16 | 273.04 |
| 5-6 | 265.84 |
| 7-16 | 263.62 |

Tabla 5. Rutas generadas por el algoritmo Clarke and Wright

| Ruta | Nodos | | Costo (\$) |
|-------|-----------------|--|------------|
| 1 | 0-12-14-16-15-0 | $C_{012} - C_{1214} - C_{1416} - C_{1615} - C_{150}$ | 507.151 |
| 2 | 0-6-10-11-0 | $C_{06} - C_{610} - C_{1011} - C_{110}$ | 344.934 |
| 3 | 0-9-8-13-7-0 | $C_{09} - C_{98} - C_{813} - C_{137} - C_{70}$ | 381.629 |
| 4 | 0-4-5-1-0 | $C_{04} - C_{45} - C_{51} - C_{10}$ | 281.173 |
| 5 | 0-2-3-0 | $C_{02} - C_{23} - C_{30}$ | 182.869 |
| Total | | | 1697.76 |

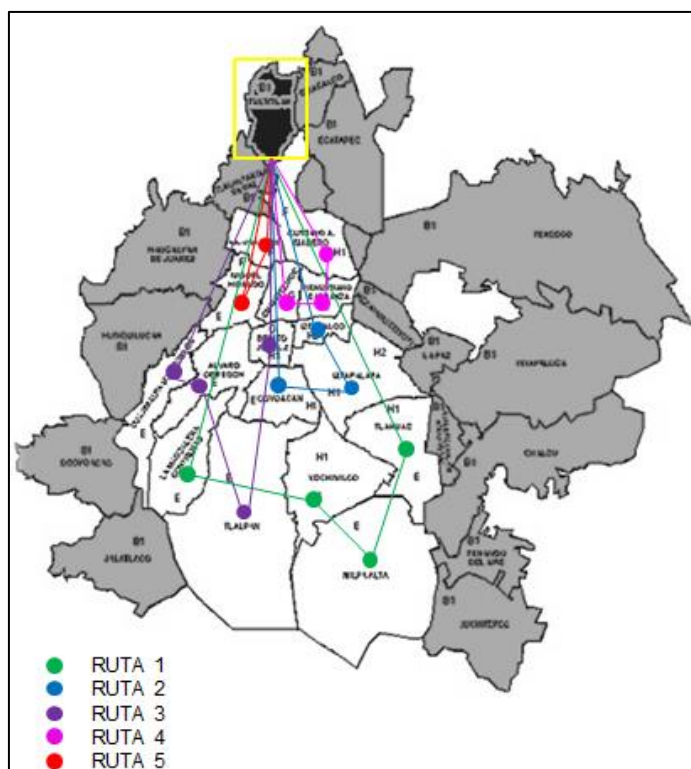


Figura 2. Red de distribución resultante por Clarke y Wright

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Validación de los resultados arrojados por el algoritmo

Para la utilización de un modelo es fundamental realizar una validación de los resultados. Para lograrlo, se toma como referencia lo que se menciona en la literatura.

De acuerdo a (Martí, 2003) el método heurístico, es decir el método de Clarke and Wright tiene una desviación del óptimo del 9.6%. Por otro lado, en el trabajo “El diseño de rutas óptimas para el transporte de mercancías: Análisis de casos representativos en empresas reales” publicado en el séptimo foro de Innovaciones Tecnológicas para el Transporte, se menciona que el algoritmo de ahorros genera soluciones con un valor de la función objetivo a 2% del óptimo.

Mientras que en el artículo (Cordeau et al., 2002) se hace mención al 6.71 % de desviación del algoritmo Clarke and Wright con respecto al mejor resultado.

4.2 Análisis mediante Grafos - v.1.3.5

En este punto se muestra la aplicación de la herramienta informática Grafos, para resolver el problema planteado anteriormente. El “software” Grafos es capaz de resolver las mismas condiciones que el algoritmo de ahorros.

Con este “software” se manejan 5 vehículos tipo rabón (Figura 3) con capacidad para 8 “pallets”, en donde cada “pallet” contiene 48 cajas lo que da un total de 384 cajas, y cada caja contiene 12 botellas de 750 ml. El origen y los destinos (Figura 4) son los mismos que se resolvieron mediante el algoritmo de ahorros.

En la Figura 5 está contenida la matriz de costos, la cual es la base para el cálculo del costo de transporte y para el cumplimiento de la restricción de distancia de transporte, condiciones que igualmente se toman en cuenta con el algoritmo de ahorros. El nuevo ruteo optimiza la ruta de transporte mediante la elección de la ruta más corta, tal y como se ilustra en la Figura 6.

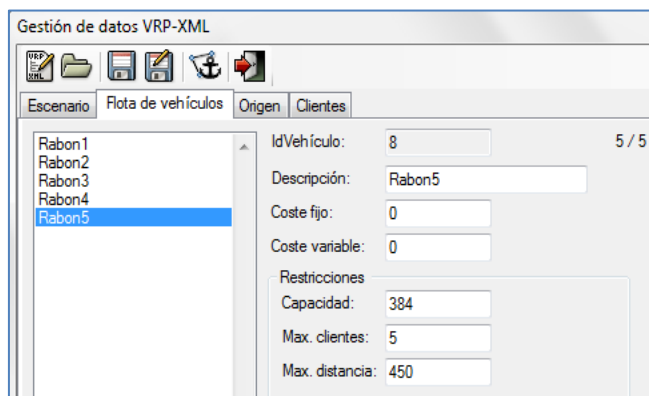


Figura 3. Flota de vehículos

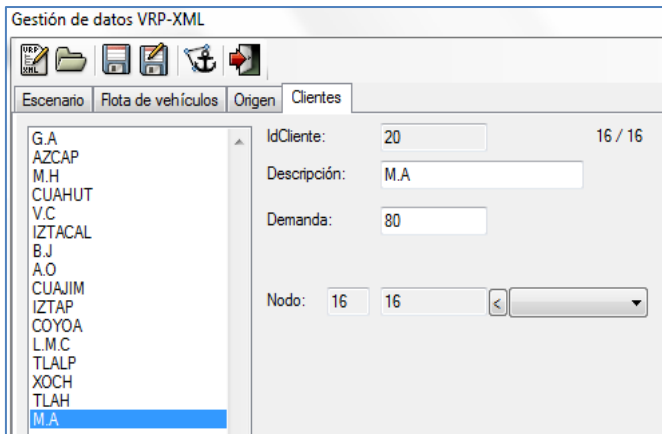


Figura 4. Clientes o destinos

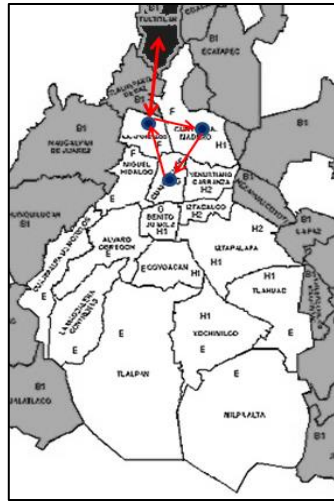
Grafos - v. 1.3.5 (cc) 2003..2012 - Alejandro Rodriguez Villalobos

Archivo Edición Ayuda

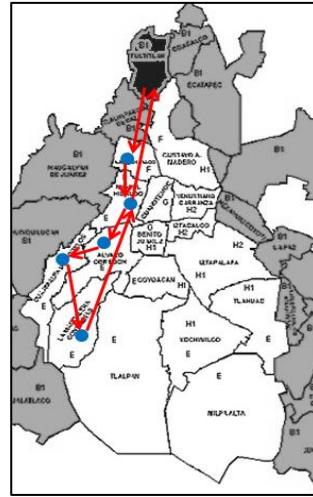
MIN MRU COSTE TRAZO

| Valor (Nodos) | Mínimo (Arcos) | Máximo (Arcos) | Coste (Arcos) | Etiqueta (Arcos) | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
|---------------|----------------|----------------|---------------|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0 | | | | | 0 | 102.08 | 0 | 82.402 | 117.55 | 134.26 | 148.58 | 108.33 | 135.21 | 133.54 | 163.85 | 124.18 | 149.25 | 143.48 | 193.13 | 180.16 | 250.66 |
| 1 | 102.08 | | | | | 0 | 33.0474 | 45.4365 | 25.6427 | 34.6608 | 48.894 | 43.9959 | 64.5389 | 98.8252 | 73.6723 | 59.0646 | 84.131 | 96.6066 | 101.13 | 93.7254 | 140.603 |
| 2 | 72.606 | 33.0474 | | | | | 0 | 27.861 | 27.861 | 46.474 | 63.473 | 40.711 | 54.656 | 62.724 | 87.3 | 59.065 | 70.878 | 84.794 | 106.52 | 112.45 | 141.38 |
| 3 | 82.402 | 45.4365 | 27.861 | | | | | 0 | 26.593 | 53.504 | 54.167 | 29.763 | 34.085 | 41.864 | 74.133 | 42.066 | 52.063 | 62.378 | 82.69 | 94.791 | 125.33 |
| 4 | 117.55 | 25.6427 | 27.861 | 26.593 | | | | | 0 | 26.882 | 34.085 | 20.831 | 40.337 | 54.253 | 60.793 | 36.505 | 59.641 | 68.774 | 79.233 | 76.15 | 123.4 |
| 5 | 134.26 | 34.6608 | 46.474 | 53.504 | 26.882 | | | | | 0 | 16.999 | 34.286 | 64.251 | 80.184 | 43.593 | 45.321 | 81.624 | 95.944 | 70.503 | 58.287 | 111.88 |
| 6 | 148.58 | 48.894 | 63.473 | 54.167 | 34.085 | 16.999 | | | | | 0 | 31.319 | 52.15 | 80.472 | 31.261 | 37.081 | 66.93 | 77.418 | 59.353 | 48.692 | 103.92 |
| 7 | 108.33 | 43.9959 | 40.711 | 29.763 | 20.831 | 34.286 | 31.319 | | | | | 0 | 29.763 | 59.353 | 43.42 | 14.32 | 41.864 | 47.626 | 48.491 | 61.283 | 95.368 |
| 8 | 135.21 | 64.5389 | 54.656 | 34.085 | 40.337 | 64.251 | 52.15 | 29.763 | | | | | 0 | 42.5553 | 79.9533 | 30.1662 | 36.8794 | 49.6431 | 74.7095 | 85.9462 | 110.552 |
| 9 | 133.54 | 98.8252 | 62.724 | 41.864 | 54.253 | 80.184 | 80.472 | 59.353 | 42.5553 | | | | | 0 | 99.978 | 71.944 | 57.768 | 57.624 | 98.249 | 108.53 | 135.42 |
| 10 | 163.85 | 73.6723 | 87.3 | 74.133 | 60.793 | 43.593 | 31.261 | 43.42 | 79.9533 | 99.978 | | | | | 0 | 40.913 | 79.147 | 75.199 | 50.997 | 23.251 | 77.418 |
| 11 | 124.18 | 59.0646 | 59.065 | 42.066 | 36.505 | 45.321 | 37.081 | 14.32 | 30.1662 | 71.944 | 40.913 | | | | | 0 | 40.827 | 40.049 | 39.559 | 53.014 | 91.91 |
| 12 | 149.25 | 84.131 | 70.878 | 52.063 | 59.641 | 81.624 | 66.93 | 41.864 | 36.8794 | 57.768 | 79.147 | 40.827 | | | | | 0 | 32.356 | 63.473 | 80.097 | 110.64 |
| 13 | 143.48 | 96.6066 | 84.794 | 62.378 | 68.774 | 95.944 | 77.418 | 47.626 | 49.6431 | 57.624 | 75.199 | 40.049 | 32.356 | | | | | 0 | 48.692 | 50.421 | 47.05 |
| 14 | 193.13 | 101.13 | 106.52 | 82.69 | 79.233 | 70.503 | 59.353 | 48.491 | 74.7095 | 98.249 | 50.997 | 39.559 | 63.473 | 48.692 | | | | | 0 | 50.421 | 47.05 |
| 15 | 180.16 | 93.7254 | 112.45 | 94.791 | 76.15 | 58.287 | 48.692 | 61.283 | 85.9462 | 108.53 | 23.251 | 53.014 | 80.097 | 78.369 | 50.421 | | | | | 0 | 67.218 |
| 16 | 250.66 | 140.603 | 141.38 | 125.33 | 123.4 | 111.88 | 103.92 | 95.368 | 110.552 | 135.42 | 77.418 | 91.91 | 110.64 | 91.622 | 47.05 | 67.218 | | | | | 0 |

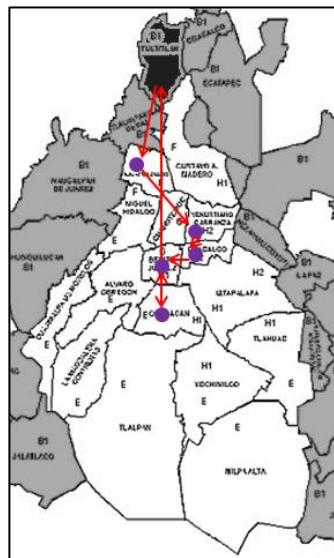
Figura 5. Matriz de costos



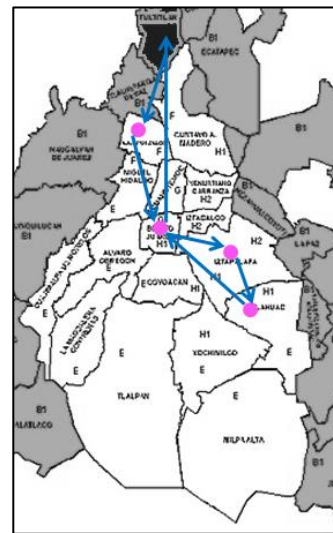
a) Ruta 1: 0-2-1-4-2-0



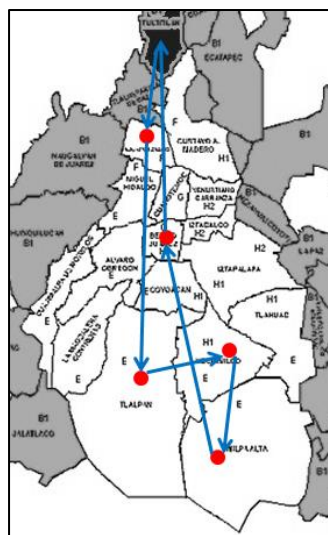
b) Ruta 2: 0-2-3-8-9-12-3-0



c) Ruta 3: 0-2-5-6-7-11-7-0



d) Ruta 4: 0-2-7-10-15-7-0



e) Ruta 5: 0-2-13-14-16-7-0

Figura 6. Rutas generadas con Grafos - v.1.3.5.

4.3 Comparación con la situación actual

El ruteo que genera la empresa de manera empírica tiene un costo total de recorrido de \$2047.90, que al compararlo con el costo de la ruta propuesta de \$1,697.82 representa un ahorro del 17.09% mensual, lo cual resulta beneficioso para la empresa ya que el reparto es un proceso continuo, que debe estar perfectamente definido para lograr la optimalidad del ruteo.

Y mediante el análisis del resultado con Grafos - v.1.3.5, se tienen 5 rutas, dicho análisis genera un costo total de recorrido de \$1,348.882, que mejora la solución del algoritmo de Clarke y Wright. Para ejemplificar y comparar los resultados se muestra la Tabla 6.

Tabla 6. Comparación de rutas generadas

| Método de definición de rutas | Costo mensual total de recorrido [\$] | Núm. de rutas | Tiempo de cálculo en cómputo | Desviación teórica respecto al óptimo (%) |
|-------------------------------|---------------------------------------|---------------|------------------------------|---|
| Empírico | 2,047.90 | 4 | - | - |
| Algoritmo de Clarke y Wright | 1,697.82 | 5 | 1 s | 9.6 |
| Grafos v. 1. 3. 5 | 1,348.88 | 5 | 5.8 h | 0 |

En los cálculos del algoritmo de Clarke y Wright se utilizó un equipo de cómputo con las siguientes características: procesador AMD A4-3320M APU, con Radeon(tm) HD Graphics 2.00 GHz, Memoria RAM de 4.00 GB y Sistema de 64-bit.

Se determina que el mejor resultado es el obtenido mediante la herramienta Grafos, por lo cual se puede asumir que es un valor “óptimo” con respecto el valor obtenido mediante el algoritmo de ahorros. Para establecer la calidad del algoritmo heurístico, se debería obtener un porcentaje de desviación que oscile entre 8 y 10%, al compararlo con el óptimo. La siguiente ecuación permite obtener el porcentaje de desviación con respecto al óptimo:

$$e_{r_a} = \left| \frac{x_n - x_{n-1}}{x_{n-1}} \right| * 100 \quad (22)$$

Dónde:

e_{r_a} = porcentaje de desviación

x_n = valor heurístico

x_{n-1} = valor óptimo

$$e_{r_a} = \left| \frac{1697.82 - 1348.882}{1348.882} \right| * 100$$

$$e_{r_a} = 25\%$$

El resultado anterior indica que el porcentaje de desviación absoluto está por encima del 9.6% que es el porcentaje de desviación teórico del algoritmo de Clarke y Wright con respecto al “óptimo”, lo cual indica que Grafos v. 1. 3. 5 proporciona un valor mucho mejor en un tiempo de cómputo superior al que se logra con el algoritmo de ahorros.

5. CONCLUSIONES

El VRP es un problema altamente combinatorio por lo que la búsqueda de la solución óptima se vuelve un problema desafiante, para encontrar una solución óptima, requiere de algoritmos que consumen un tiempo de cómputo elevado. El VRP está dentro de los problemas en los que un aumento en el número de nodos del grafo (clientes o puntos de paso) supone un aumento exponencial del tiempo de ejecución, y rápidamente sobrepasa las capacidades de cálculo de los ordenadores más potentes.

En relación con los resultados se determina que la aplicación del algoritmo de ahorros al modelo del VRP que es representado por el problema de distribución de la empresa, permite obtener los siguientes éxitos:

- cumplir con el objetivo planteado: optimizar la red de distribución,
- ahorro del 17% de los costos,
- aprovechamiento máximo de la flota de vehículos,
- se generan 5 rutas factibles,
- tiempo de ejecución mínimo,
- aumento en la satisfacción del cliente: cumplimiento de la demanda en una sola visita

Es importante aclarar que los datos analizados pertenecen a una demanda mensual promedio, por lo cual el ruteo generado es mensual, y que no siempre va a ser el mismo debido a que la demanda no es constante. Pueden existir casos en donde la demanda se genera diariamente por lo cual el ruteo se tiene que hacer todos los días.

En relación con el análisis de resultados se demuestra que la modelación matemática permite una mejora en la toma de decisión en la empresa. Si bien la práctica empírica prevalece en la mayoría de las microempresas, es necesario mostrar mediante aplicaciones prácticas que las herramientas que ofrece la Investigación de Operaciones permiten una mejor toma de decisión.

Se comparan los resultados obtenidos con el “software” y con el método heurístico, se analiza la desviación que resulta en 25%, este valor indica que el algoritmo de Clarke y Wright está muy alejado del “óptimo”, sin embargo, se pueden enunciar las siguientes bondades:

- La facilidad de aplicar el algoritmo de Clarke y Wright en una hoja de Excel.
- La aplicación del algoritmo de Clarke y Wright en Excel se ejecuta en segundos, garantizando la identificación de un ruteo rápidamente.

Por otro lado, se pueden hacer las siguientes anotaciones:

- Sacrifica optimalidad por tiempo de ejecución.
- La disminución de tiempo permite al tomador de decisiones actuar de manera eficaz.
- Respecto a grafos – v. 1. 3. 5, se puede perder tiempo en analizar los comandos y funciones, mientras que programar una sencilla ecuación de ahorros y establecer las restricciones que se requieran en una hoja de Excel, se obtiene un resultado favorable.
- Otra ventaja es que Excel es manejado por una gran cantidad de usuarios, lo que permite el entendimiento del algoritmo
- El tiempo de ejecución del algoritmo en grafos resultó de 5.8 horas para este proyecto. Mientras que la implementación del algoritmo de ahorros en Excel aún cuando se tuvo el 25% de desviación con respecto al valor óptimo, se ejecuta en segundos, por lo tanto, para tener un ruteo óptimo se tendría que esperar a que termine la ejecución del algoritmo en grafos que tal vez sean días, y para este tiempo, se pierden recursos y sobre todo tiempo. De ahí la importancia de los algoritmos heurísticos.

REFERENCIAS

- ANAYA T. J.J. (2007). *Logística integral “La gestión operativa de la empresa”*. Ed. ESIC.
- BENITO Q., A. (2015). *Problemas de rutas de vehículos: modelos, aplicaciones logísticas y métodos de resolución*. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales, pp. 128.
- CLARKE, G. Y WRIGHT, J.W. (1964). *Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points*. Operations Research, Vol. 2, pp. 568-581.
- CORDEAU, J.F. GENDREAU, M. LAPORTE, G. POTVIN, J-Y. y SEMET, F. (2002). *A Guide to Vehicle Routing Heuristics*. The Journal of the Operational Research Society. Vol. 53, N. 5. Montreal Canada, pp. 512-522.
- GRAFOS (2016). <http://arodrigu.webs.upv.es/grafos/doku.php?id=software>
- KIRBY, C. Y BROSIA, N. (2011). *La logística como factor de competitividad de las Pymes en las Américas*. Banco Interamericano de Desarrollo, pp. 1-42.
- LAPORTE, G. (2007). *What You Should Know about the Vehicle Routing Problem*. Les Cahiers du GERAD and Canada Research Chair in Distribution Management. August. Montréal (Québec) Canada, pp. 22
- LYSGAARD, J. (1997). *Clarke & Wright’s Savings Algorithm*. Department of Management Science and Logistics. The Aarhus School of Business. Noruega, pp. 1-8
- MARTÍ, R. (2003). *Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria*. Matemáticas 1(1), pp. 3-62.
- MILLER, C. TUCKER, A. Y ZEMLIN, R. (1960). Integer programming formulations and traveling salesman problems. J. of the ACM, 7, pp. 326-329.

- NOVELLE, J.J., CAMPOS, J., FORMELLA, A., CARRIÓN, P. y GÁLVEZ, J.F. (2009). *Adaptación y optimización del algoritmo Clarke y Wright a un problema de distribución multirrestrictivo*. IX Congreso Gallego de Estadística e Investigación de Operaciones. Ourense, 12-14 noviembre 2009 Campus Universitario As Lagoas s/n.
- PEMEX, 320772. (2016). *Indicadores petroleros*. Petróleos Mexicanos. (http://www.pemex.com/ri/Publicaciones/Indicadores%20Petroleros/epublico_esp.pdf)
- RAND, G. K. (2009). *The life and times of the Savings Method for Vehicle Routing Problems*. Orion ISSN 0529-191-X. Vol. 25(2), pp. 125-145.



21 Optimización de una red de distribución de un material peligroso al norte de la ciudad de México

Esther Segura Pérez

Ann Godelieve Wellens

Alan Alberto Gómez Hernández

Nydia Lizeth Rojas Mejía

Universidad Nacional Autónoma de México, México

Daniel Alexander Tello Gaete

Universidad Austral de Chile, Chile/ Universidad Nacional Autónoma de México, México

RESUMEN

En este trabajo se optimiza una red de distribución de un material peligroso desde una Terminal de Almacenamiento y Distribución (TAD) a un conjunto de estaciones de servicio (ES) ubicado en el norte de la Ciudad de México. La empresa distribuye el material peligroso con flota homogénea, y desea saber si la inclusión de una flota heterogénea minimizará los costos totales de distribución, que incluyen ruteo e inventarios, sin alterar la capacidad de los tanques de almacenamiento de las estaciones ni de la flota y condiciona la satisfacción de la demanda de los clientes finales. La optimización de la red se logra con una metodología de tres etapas: recopilación y análisis de información, descripción de los componentes del problema y propuesta de un modelo de optimización que se resuelve a través del “software” LINGO V.11; y finalmente, análisis de los resultados y propuesta de la cantidad que debe abastecerse por vehículo y tipo a cada ES, así como de la calendarización de entregas.

Palabras clave: distribución de combustibles, modelación de la demanda, frecuencia de viajes.

1. INTRODUCCIÓN

En este trabajo se optimiza una red de distribución de un material peligroso al norte de la Ciudad de México. Para ello, se analiza la red de distribución actual que consiste en suministrar el combustible desde la Terminal de Almacenamiento y Distribución (TAD) ubicada en Azcapotzalco a 18 estaciones de servicio (ES) ubicadas al Norte de la Ciudad de México a través de flota homogénea. Se lleva a cabo un análisis de los costos totales de operación, además de considerar las capacidades de los tanques de almacenamiento de las ES y la capacidad de la flota. Es un problema de diseño de redes de distribución (DRD) cuyas variables a ser optimizadas son: el tipo de flota a ser utilizada, y la cantidad a ser enviada en cada vehículo minimizando los costos de distribución y de inventarios.

1.1 Antecedentes

En la Ciudad de México (CM) existen cuatro terminales de almacenamiento y distribución, a partir de las cuales se distribuyen tres tipos de combustible (GA, GB y D) a 371 estaciones de servicio distribuidas geográficamente en las 16 delegaciones y algunos municipios del Área Metropolitana. Las TAD cuentan con un tamaño de flota homogénea limitada tipo C3 (NOM-012-SCT-2-2014). La empresa quiere saber si se minimizan los costos totales de la operación si la red de distribución de una sola TAD y de un solo tipo de combustible cambia a una flota heterogénea para abastecer a 18 estaciones de servicio (ES) ubicadas en la Delegación Azcapotzalco al norte de la CM. En la Figura 1 se observa el área de estudio.

1.2 Objetivo y planteamiento del problema

Cada una de las ES ha implantado un sistema de revisión continua de inventarios, con la finalidad de mantener un nivel de servicio para los consumidores finales, así como un método de pronóstico de la demanda y un sistema de calendarización simple. Con estas herramientas las ES realizan los pedidos a la empresa proveedora con días de anticipación.

La empresa transporta cada pedido desde la TAD hasta las ES, empleando una flota homogénea con capacidad de 20 m³ (Figura 2). La empresa desea conocer si la inclusión de flota heterogénea en la red de distribución actual minimiza los costos totales de la operación, respetando las capacidades en los tanques de almacenamiento de las ES así como las capacidades de la flota, satisfaciendo las demandas de los clientes finales y considerando una adecuada administración del inventario, encontrando la configuración de la red de distribución que minimiza los costos involucrados: inventarios y ruteo.

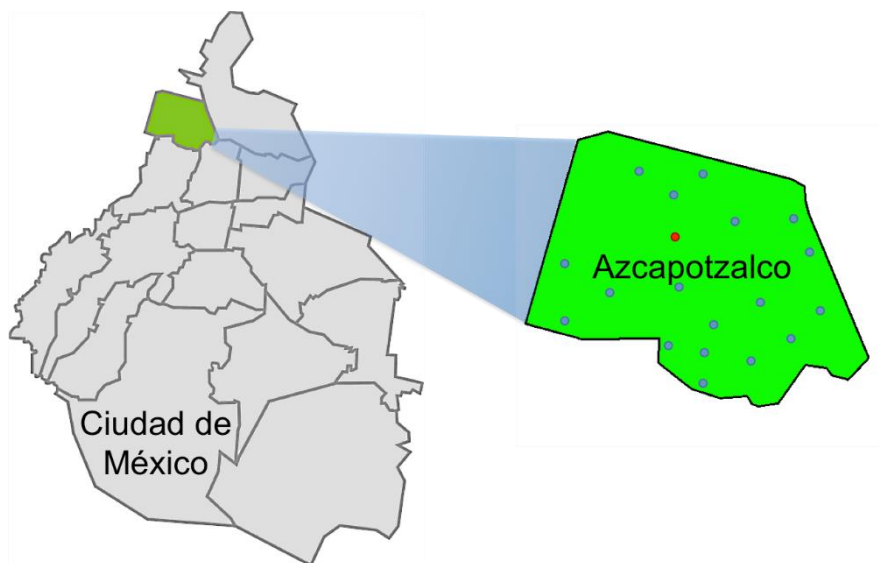


Figura 1. Área de estudio

Fuente: adaptado de

http://www.mapamexico.com/Mapa_Ubicacion_Azcapotzalco_Mexico_DF.htm

1.3 El diseño de redes de distribución

El problema de DRD es establecer la mejor manera de distribuir los productos desde los CD's hasta los nodos de demanda seleccionando la estructura de la red, satisfaciendo la demanda de los clientes y minimizando los costos totales. La función objetivo generalmente está expresada en términos de transporte, inventarios y costos de oportunidad (Ambrosino et al., 2009). El problema de DRD involucra algunas decisiones a ser tomadas, algunas de ellas son: localización, asignación, ruteo e inventarios. Estas decisiones están estrechamente relacionadas con los problemas de localización y ruteo (LRP) y los problemas de ruteo e inventarios (IRP).

Por su naturaleza, el modelo empleado por la compañía para la distribución de gasolinas en la Ciudad de México y Área Metropolitana se define como una variación del Problema de Ruteo - Inventarios (IRP, por sus siglas en inglés). En el Modelo IRP (Coelho et al., 2012), que puede ser descrito como una combinación de los problemas de ruteo de vehículos y gestión de inventarios, un proveedor debe transportar uno o varios productos a un determinado número de clientes dispersos geográficamente, sujeto a ciertas restricciones. El modelo optimiza simultáneamente la gestión de inventarios, ruteo de vehículos y la calendarización de los envíos.

En este proyecto se optimizan el tipo de flota a ser utilizada y el ruteo asociado a cada vehículo, por lo que de manera natural corresponde a una variante al problema de inventarios distribución o bien los problemas IRP por sus siglas en inglés. En el área de complejidad computacional los problemas relacionados con DRD se les conoce como NP-Complejos o

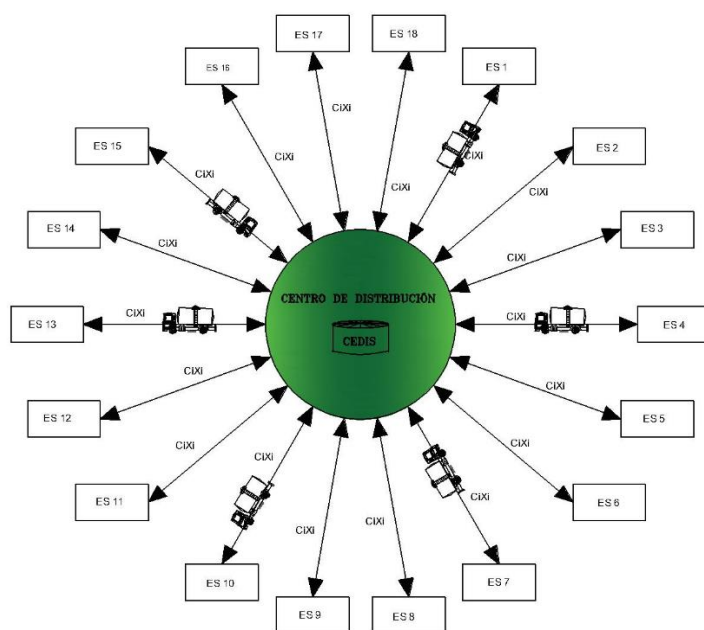


Figura 2. Red de distribución de la empresa para la delegación Azcapotzalco

Fuente: Elaboración propia

“NP-Hard”, de manera coloquial significa que los problemas son altamente combinatorios y muy difíciles de resolver, por lo que se han sugerido las técnicas de solución heurística para su solución. En este proyecto se propone una formulación matemática y una técnica de solución exacta que responde a la minimización de los costos asociados a la operación y distribución, así como los costos de administración de inventarios.

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para la optimización de la red de distribución se propone una metodología de tres etapas (ver Figura 3): la primera consiste en hacer una recopilación y análisis de información la cual también incluye un análisis de los modelos de optimización de la variante de IRP que se han propuesto, como segunda, representar la red de distribución a través de un modelo matemático y dar solución a través de la programación en el “software” LINGO V.11 (Lingo, 2016) y proponer una estrategia de solución que permita conocer la mejor configuración de red que minimiza los costos asociados a la distribución actual y finalmente en la última etapa analizar los resultados y proponer la mejor configuración de la red de distribución el tipo y tamaño de flota así como la calendarización.

2.1 Recopilación y análisis de la información

La primera etapa consiste en el análisis de la información obtenida y su procesamiento previo a la resolución de un modelo de optimización matemática. En esta etapa se caracteriza la demanda y debido a que sólo se cuenta con la información de ventas de dos de 18 estaciones de servicio se emplearon las estructuras geométricas conocidas como Diagramas de Voronoi para delimitar las áreas a ser atendidas por cada ES y así estimar la demanda en todas y cada una de las 18 estaciones. También se analizan y calculan los costos asociados con la distribución, así como una revisión en la literatura de los modelos de calendarización para tomar como base algunos modelos previamente diseñados y adecuarlos a la situación que se quiere resolver.

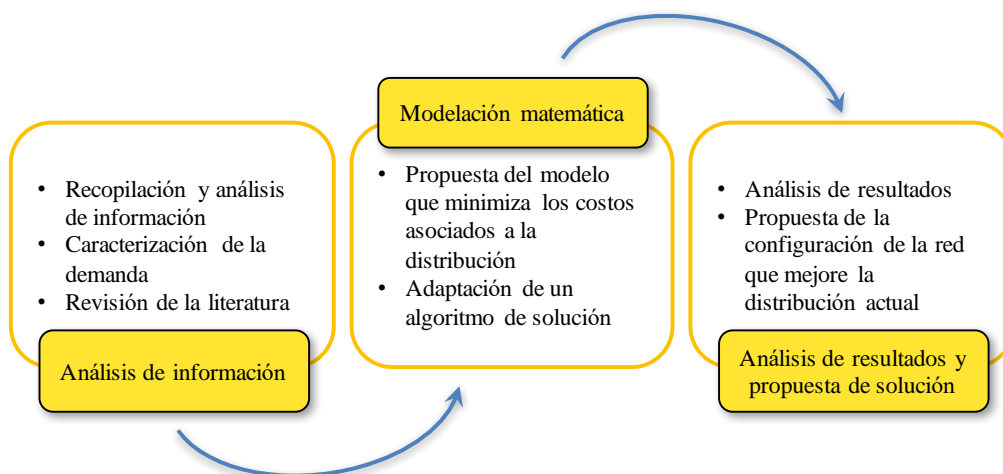


Figura 3. Metodología de investigación

Fuente: Elaboración propia

2.2 Datos de la demanda

Se tiene el histórico de ventas en dos gasolineras de la Delegación Azcapotzalco. Estas dos estaciones son ES1 y ES6, y los datos que se tienen corresponden a las ventas de la gasolina A entre enero de 2014 y octubre del 2015 (Tabla 1).

Se observa que en la ES1 se vende en promedio aproximadamente la mitad de la cantidad de gasolina A que en la ES6. Esto podría deberse a que la ES1 se encuentra en una zona residencial, mientras que la ES6 se encuentra en una zona industrial. Estos datos son consistentes con los reportados por el INEGI (2016) de donde se puede determinar que las ventas internas del combustible A en la réplica entre enero de 2015 y abril de 2016 fueron de 270,493 como promedio mensual por cada estación de servicio. Cabe mencionar que se venden tres tipos de combustible en las ES; sin embargo, en este primer estudio la empresa manifestó su interés en modelar únicamente el combustible A, debido a la importancia de su volumen de venta a nivel nacional.

Tabla 1. Análisis de ventas mensuales (enero, 2014 a octubre, 2015) ES1 y ES6

| Mes | Combustible vendido (l/mes) | |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|
| | ES1 | ES6 |
| ene-14 | 333,161.46 | 663248.90 |
| feb-14 | 314,145.69 | 618,094.66 |
| mar-14 | 339,806.03 | 679,913.66 |
| abr-14 | 319,836.16 | 622,611.17 |
| may-14 | 344,646.63 | 687,752.93 |
| jun-14 | 324,776.57 | 648,803.35 |
| jul-14 | 322,360.49 | 635,175.28 |
| ago-14 | 332,628.01 | 662,182.11 |
| sep-14 | 325,780.98 | 652,316.85 |
| oct-14 | 339,960.13 | 679,036.07 |
| nov-14 | 318,111.98 | 632,709.24 |
| dic-14 | 318,614.36 | 666,964.46 |
| ene-15 | 306,736.62 | 636,676.45 |
| feb-15 | 299,331.58 | 597,821.58 |
| mar-15 | 329,734.48 | 650,398.92 |
| abr-15 | 305,765.54 | 586,134.57 |
| may-15 | 325,378.03 | 621,867.47 |
| jun-15 | 325,119.17 | 614,569.25 |
| jul-15 | 332,395.14 | 629,435.97 |
| ago-15 | 322,231.23 | 625,627.42 |
| sep-15 | 331,590.65 | 637,379.72 |
| oct-15 | 357,038.52 | 678,586.62 |
| Promedio | 325,523.24 | 642,150.30 |

Fuente: Concesionario

2.3 Determinación del coeficiente de proporcionalidad

A partir de la información de demanda presentada se puede inferir la demanda en las demás estaciones de servicio mediante un coeficiente de proporcionalidad. Este coeficiente se obtiene de una estimación del alcance geográfico que tiene la oferta en cada estación según su ubicación, sus competidores más próximos y la densidad de población del área en la que se encuentran. La delegación Azcapotzalco se compone por 86 colonias de diferentes usos de suelo, principalmente habitacional, habitacional mixto y una amplia zona industrial (SEDUVI, 2016)

Existen diferentes algoritmos gráficos que se pueden usar para la partición de un plano en regiones. Dentro de este estudio, la suposición lógica indica que los clientes irían al establecimiento más cercano a su domicilio y no a aquellos que sean muy lejanos. Tomando en cuenta lo anterior, se eligió la estructura conocida como polígonos de Thiessen, diagramas de Voronoi o teselación de Dirichlet y las correspondientes triangulaciones de Delaunay (ve por ejemplo Fortune, 1986; Gallier, 2011; Edelsbrunner, 2014) para delimitar las áreas de proximidad de cada estación de servicio.

El diagrama de Voronoi es una estructura geométrica fundamental que captura la información de proximidad de un conjunto de puntos, descomponiendo el plano en regiones poligonales convexas (Okabe et al., 1945). Con ayuda de los diagramas de Voronoi se encontró, para cada estación de servicio, la region de puntos que están al menos tan cerca de esta estación de servicio que de cualquier otra; el área correspondiente se emplea como coeficiente de proporcionalidad en la estimación de la demanda.

2.4 Estimación de la demanda en las ES

Para la estimación de la demanda se utilizaron las áreas obtenidas al partir el plano con los diagramas de Voronoi. Cada polígono de Voronoi corresponde al área de alcance de una ES dentro de la Delegación Azcapotzalco. Cada área estará compuesta por las porciones de las colonias que abarque su polígono asociado. Estas porciones también significarán las porciones de población de cada colonia que le correspondan a cada polígono usando las densidades de población obtenidas del INEGI (2016).

Utilizando las herramientas de AutoCAD y bases de datos extraídas del INEGI (2016), se obtiene el área de cada colonia de la Delegación Azcapotzalco y a partir de éstas el área de cada polígono de Voronoi, Figura 4. Conociendo la porción de las colonias en cada uno de los polígonos de Voronoi se puede encontrar el número de habitantes asociado. Asimismo, se cotejó la ubicación de cada ES con el uso de suelo reportado por SEDUVI (2016) y se obtuvo por inspección el número de bombas de cada ES. La información anterior está resumida en la Tabla 2.

Si bien se podría emplear como coeficiente de proporcionalidad el número de habitantes a los que se estima da servicio cada ES, en el problema bajo estudio no generaría demandas

reales, ya que las zonas industriales tienen muy pocos habitantes, pero una muy importante demanda de combustibles, por lo que este método estimaría una demanda artificialmente baja en las zonas industriales. Asimismo, las dos ES de las que se obtuvo la demanda se ubican en áreas clasificadas como *habitacional mixto*, por lo que el uso de suelo tampoco proporciona información suficiente para la estimación de la demanda en las otras ES.

Se optó por usar como coeficiente de proporcionalidad directamente el área de Voronoi y tomar en cuenta el número de bombas que despachan el combustible A para estimar la demanda de cada ES (ver Tabla 3) a partir del consumo promedio por bomba en las ES 1 y 6 y multiplicándolo por la cantidad de bombas de cada ES. En todos los casos, se divide la demanda por el área de Voronoi correspondiente y se multiplica por el área de Voronoi de la ES bajo estudio:

$$\text{Demanda}_i = n_i \frac{\left(\frac{D_1}{n_1} + \frac{D_6}{n_6}\right)}{2} \frac{V_i}{\left(\frac{V_1+V_6}{2}\right)} \frac{1}{\text{mes}} \quad (1)$$

Donde D_i es la demanda, n_i el número de bombas y V_i el área de Voronoi de la estación de servicio i .

Así, por ejemplo, para la ES2, que cuenta con 8 bombas para el combustible A, se encuentra la demanda mensual de la siguiente forma:

$$\text{Demanda ES2} = 8 \frac{\left(\frac{325,523.3}{3} + \frac{642,150.3}{6}\right)}{2} \frac{1.18}{\left(\frac{1.88+1.469}{2}\right)} \frac{1}{\text{mes}} = 605,652.28 \frac{1}{\text{mes}} \quad (2)$$

Los resultados se resumen en la Tabla 3; asimismo, se proporciona la distancia de cada ES a la TAD.

2.5 Modelación matemática y algoritmo de solución

Se desarrolló un modelo matemático que, con base en las demandas estimadas de la Tabla 3, minimiza los costos de operación e inventario y permite conocer la cantidad de combustible a ordenar, así como la cantidad de camiones a enviarse a cada ES. El modelo corresponde a un modelo no lineal entero mixto, resuelto con Lingo V11 para un período de planeación de un mes.

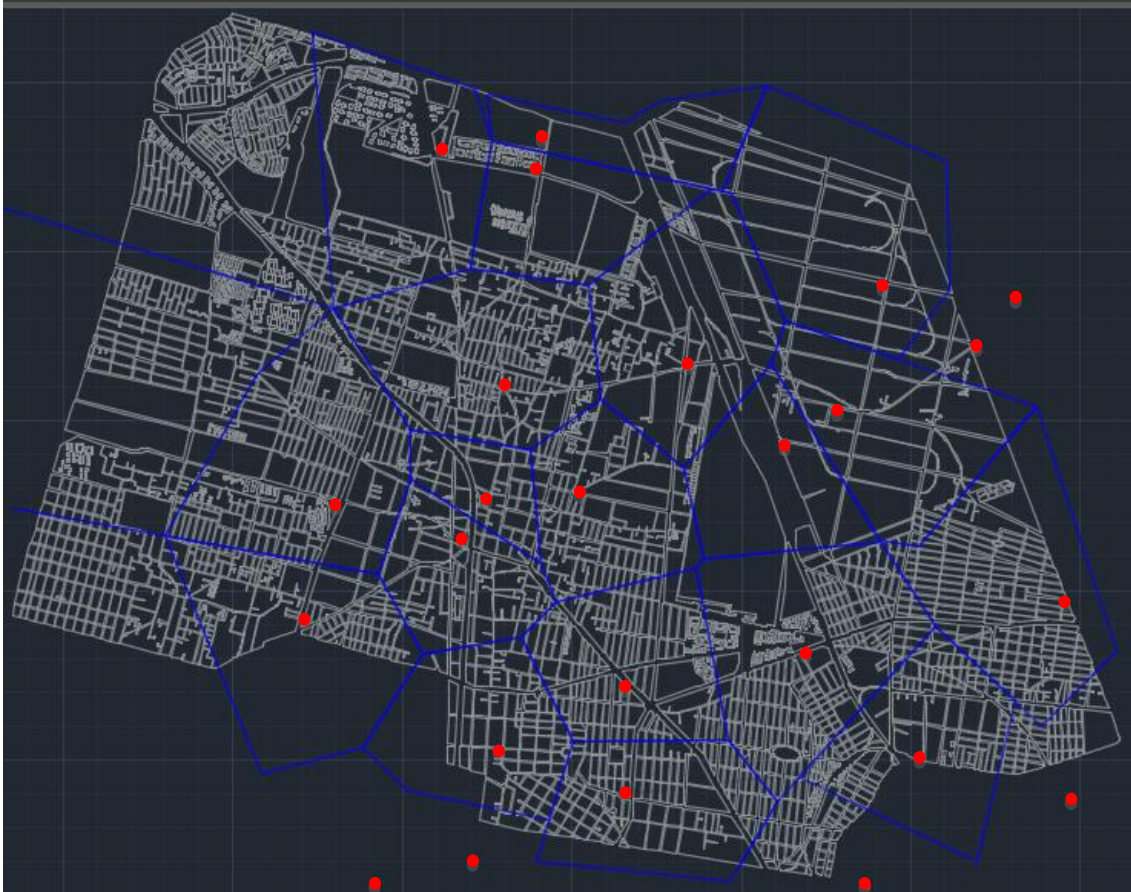


Figura 4. Polígonos de Voronoi para las estaciones de servicio, Delegación Azcapotzalco
Fuente: Elaboración propia usando AutoCAD 2015.

3. DETERMINACIÓN DE LOS COSTOS CONSIDERADOS

Los costos de red de distribución incluyen costos de almacenamiento, costos de transporte y el costo para generar la orden.

3.1 Costo de almacenamiento

Los costos de almacenamiento incluyen tasas de almacenamiento físico, de retorno de capital detenido en existencias, de seguros, de transporte, manipulación y distribución de material y finalmente de obsolescencia del material y se encuentran entre el 14% y 36% del valor promedio de los productos almacenados (Tawfik y Chauvel, 1993; Benitez, 2012). En este estudio se considera una tasa del 20% del costo de la demanda promedio mensual (Wellens et al., 2017). Considerando un costo de compra del producto, C_p , de 10 \$/l, se encuentre que:

$$C_a = 20\% \cdot c_p \cdot \frac{Q_i}{2} \quad (3)$$

Donde:

C_a = Costo de almacenamiento, \$/mes

C_p = Costo del adquisición del combustible, \$/l

Q_i = Cantidad a ordenar en cada ocasión, l

Tabla 2. Área de Voronoi, población, uso de suelo y número de bombas por ES

| Estación | Área Voronoi | No. habitantes | Uso de suelo | Cantidad de bombas |
|----------|--------------|----------------|---------------------------|--------------------|
| ES 1 | 1.88 | 11534 | Habitacional mixto | 3 |
| ES 2 | 1.18 | 1598 | Industrial | 8 |
| ES 3 | 1.399 | 10501 | Habitacional | 3 |
| ES 4 | 1.435 | 14856 | Habitacional mixto | 6 |
| ES 5 | 2.068 | 29838 | Habitacional | 4 |
| ES 6 | 1.469 | 348 | Habitacional mixto | 6 |
| ES 7 | 0.536 | 6302 | Habitacional mixto | 5 |
| ES 8 | 1.975 | 2650 | Habitacional con comercio | 6 |
| ES 9 | 2.262 | 429 | Industrial | 8 |
| ES 10 | 1.322 | 18603 | Industrial | 4 |
| ES 11 | 1.987 | 16248 | Habitacional | 4 |
| ES 12 | 2.1 | 36381 | Habitacional | 8 |
| ES 13 | 1.017 | 25008 | Habitacional mixto | 6 |
| ES 14 | 2.12 | 14190 | Habitacional | 4 |
| ES 15 | 1.42 | 30845 | Habitacional | 8 |
| ES 16 | 1.145 | 16257 | Habitacional | 7 |
| ES 17 | 1.164 | 10796 | Industrial | 6 |
| ES 18 | 0.881 | 3800 | Industrial | 4 |

Fuente: INEGI, SEDUVI y Google Street View

3.2 Costo de transporte

Los costos de combustible variables, que son directamente proporcionales a la distancia a recorrer del origen hasta el destino, se calcularon con base la Ecuación 4, propuesta por Wellens et al. (2017).

$$C_n = \frac{2d_n}{R_u \cdot \eta_u} N_n \cdot c_D \quad (4)$$

Donde:

C_n = Costo de transporte, \$/mes

n = Número de ES (1-18)

d = Distancia entre la TAD y la estación de servicio, m

N = Número de viajes que realiza una unidad de transporte al mes

R = Rendimiento de gasolina de la unidad de transporte u , km/l

η = Eficiencia de la unidad de transporte u

u = tipo de unidad que se empleará para el abastecimiento a las estaciones de servicio (20, 40 o 60 m³)

c_D = Costo del combustible requerido para el viaje, \$/l

Tabla 3. Demanda mensual de gasolina A por ES

| ESTACIÓN | Demanda estimada (l/mes) | Distancia a la TAD (km) |
|-----------------|---------------------------------|--------------------------------|
| ES 1 | 324,386.23 | 5.5 |
| ES 2 | 605,652.28 | 6.9 |
| ES 3 | 269,271.46 | 3.2 |
| ES 4 | 552,401.07 | 3.8 |
| ES 5 | 530,715.64 | 5.2 |
| ES 6 | 640,420.00 | 7.1 |
| ES 7 | 171,943.66 | 3.5 |
| ES 8 | 760,273.25 | 7.4 |
| ES 9 | 1,161,004.63 | 7.7 |
| ES 10 | 339,267.93 | 1.3 |
| ES 11 | 509,928.42 | 4.4 |
| ES 12 | 1,077,855.75 | 4.1 |
| ES 13 | 391,492.61 | 5.3 |
| ES 14 | 544,060.52 | 3.2 |
| ES 15 | 728,835.80 | 2.3 |
| ES 16 | 514,227.02 | 4.7 |
| ES 17 | 448,080.03 | 7.7 |
| ES 18 | 226,093.08 | 6.7 |

Fuente: Elaboración propia

Para las especificaciones de cada una de las unidades se considera la Tabla 4; para el precio del diesel se consideró un valor de 13.77 \$/l.

Datos obtenidos de un informe presentado al Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones de Chile (Steer, 2011) sugieren que los costos fijos son de alrededor del 125% del costo de combustible. Considerando los valores promedios de distancia, rendimiento y número de viajes por ES de acuerdo con la demanda obtenida en la Tabla 3 y la capacidad del tanque en cada ES, se obtiene para los costos mensuales fijos (Ecuación 5).

Tabla 4. Ficha técnica de las unidades de 20, 40 y 60 m³ empleadas por la empresa

| Especificaciones | 20 m ³ | 40 m ³ | 60 m ³ |
|--------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Tipo de unidad | 3C | T3-R2 | T3-S2-R4 |
| Rendimiento máximo | 3.66 | ND | ND |
| Rendimiento real | 2.95 | 2.48 | 1.83 |
| Eficiencia | 0.8 | 0.65 | 0.65 |
| Modelo | Freighliner M2 35k | Freighliner Columbia | Freighliner Columbia |
| Motor | MBE4000 de 12.8L EPA | Cummins ISX | Cummins ISX |
| Tanque de gasolina | 189 | 270 | 271 |

Fuente: Elaboración propia

$$c_f = 1.25 \frac{2\bar{d}_n}{\bar{R}_u \cdot \bar{\eta}_u} \bar{N}_n \cdot c_D = 1.25 \frac{2(5)}{(2.42)(0.7)} 35 \cdot c_D = 3556.3 \$ \quad (5)$$

El monto obtenido en la Ecuación 5 es para toda la estación de servicio y se tiene que dividir entre la cantidad de viajes que se realizan en cada estación, $\bar{N}_{n,ES}$.

Considerando tanto gastos fijos como gastos variables de transporte, se tiene entonces:

$$c_T = c_n + c_f = \frac{3556.3}{\bar{N}_{n,ES}} + \frac{2d_n}{R_u \cdot \eta_u} N_n \cdot c_D \quad (6)$$

en donde N_n depende de la calendarización obtenida.

3.3 Costo de ordenar

Dentro del cálculo del costo de ordenar se incluye el sueldo de las personas que intervienen en la orden, así como gastos fijos (electricidad, teléfono, uso de computadoras, ropa de seguridad, señalamientos de seguridad, calzas para las ruedas del carro tanque, extintores, herramientas de medición de la calidad del producto).

Wellens et al. (2017) llegan a un sueldo de 50 pesos por hora, para tres trabajadores, correspondiendo a un total de 150 pesos por cada orden emitido y surtido. Se asume que los demás gastos fijos prorrateados ascienden al mismo monto, dando un total de 300 pesos por estación y por orden emitido.

4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN

Definiendo los índices, variables de decisión y parámetros empleados, se puede definir la función objetivo, así como las restricciones al que está sujeto el modelo.

Índices

j : camión, $j = 1, 2, 3$.

k : estación de servicio, $k = 1, 2, \dots, 18$.

Variables de decisión

Q_{jk} = cantidad de combustible abastecido por el camión j a la ES k en cada orden (m^3).

X_{jk} = número de camiones tipo j que transportan combustible tipo i a la ES k (número).

Parámetros

Ch_k : Costo de almacenamiento del combustible en la ES k ($(\$/m^3)/mes$)

Ct_{jk} : Costo de transporte del combustible por un camión j a la ES k $\left(\frac{\$}{camión \cdot ES}\right)$

Co_k : Costo de ordenar para la ES k $\left(\frac{\$}{orden}\right)$

D_k : Demanda del combustible en la ES k para el período de planeación (m^3)

N_k : Cantidad de órdenes a realizar en cada estación en el horizonte de planeación

K_{ik} : Capacidad de almacenamiento de combustible i en la ES k (m^3)

C_j : Litros transportados por camión j $\left(\frac{m^3}{camión}\right)$

Función objetivo

$$Min = \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{18} Ch_k \cdot \frac{Q_{jk}}{2} + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{18} ((Co_{jk} \cdot X_{jk} \cdot D_k) / Q_k) \quad (7)$$

Restricciones

1. Restricción de capacidad en tanques de almacenamiento

$$\sum_{j=1}^3 Q_{jk} \leq K_k \quad \forall k \quad (8)$$

2. Restricción de seguridad: el llenado del tanque debe ser superior al 90%

$$Q_{jk} \geq 0.90 \cdot C_j \cdot X_{jk} \quad \forall j, k \quad (9)$$

3. Restricción de seguridad: el llenado del tanque debe no debe superar el 95%

$$Q_{jk} \leq 0.95 \cdot C_j \cdot X_{jk} \quad \forall j, k \quad (10)$$

4. Restricción de no negatividad

$$Q_{jk} \geq 0 \quad X_{jk} \geq 0 \quad y \quad X_{jk} \in \mathbb{Z} \quad \forall j, k \quad (11)$$

La Ecuación 7 es la función objetivo que minimiza los costos de distribución, inventarios y ruteo, las Ecuaciones de la 8 a la 10 muestran las restricciones de capacidad en los camiones, en los tanques de almacenamiento y la restricción de seguridad en la operación del camión, la cual dice que la carga debe estar entre el 90% y 95% de la capacidad del tanque para evitar accidentes por sobrecarga y/o fugas (Ecuación 10), y por último en la Ecuación 11 se muestran las condiciones de no negatividad, e indican que la cantidad de camiones a ser enviado a las ES debe ser un número entero.

5. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En esta sección se muestran y analizan los resultados obtenidos en la modelación matemática. Para ello se programó el modelo señalado por las Ecuaciones 6 a 10 en el “software” LINGO V.11. (Lingo, 2016) y se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 5).

En la columna 1 se observa la estación de servicio analizada. La segunda columna determina la cantidad en metros cúbicos que se enviarán en cada vehículo tipo 1, tipo 2 y tipo 3 respectivamente, la cual debe estar entre 95% y 100% de su capacidad. Entre la tercera y quinta columna se especifica el número de camiones a utilizar, en la sexta columna se observa la demanda en cada estación y finalmente en la última columna se muestra en días el tiempo en que se agota el inventario.

Se llevó a cabo un análisis comparativo (Tabla 6) de los costos totales de operación actuales con las logradas en la optimización, el cual sólo es posible para el caso de las estaciones de servicio 1 y 6, ya que son en donde se poseen datos reales. En la ES 1 existe un ahorro del 47% y es abastecido con el camión tipo 2, mientras que la ES 6 hay un ahorro de 43% y es abastecido con el camión tipo 3.

Tabla 5. Resultados obtenidos con LINGO V.11

| Estación de servicio | Q [m ³] | No. Camiones | | | Demanda (m ³ /mes) | Punto de reorden [días] |
|----------------------|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------------------------|-------------------------|
| | | 20 [m ³] | 40 [m ³] | 60 [m ³] | | |
| ES 1 | 36 | | 1 | | 328.9 | 3.3 |
| ES 2 | 54 | | | 1 | 614.1 | 2.7 |
| ES 3 | 36 | | 1 | | 273.0 | 4.0 |
| ES 4 | 54 | | | 1 | 560.1 | 2.9 |
| ES 5 | 36 | | 1 | | 538.1 | 2.0 |
| ES 6 | 54 | | | 1 | 649.3 | 2.5 |
| ES 7 | 19 | 1 | | | 174.3 | 3.3 |
| ES 8 | 54 | | | 1 | 770.8 | 2.1 |
| ES 9 | 54 | | | 1 | 1177.1 | 1.4 |
| ES 10 | 36 | | 1 | | 344.0 | 3.2 |
| ES 11 | 36 | | 1 | | 517.0 | 2.1 |
| ES 12 | 36 | | 1 | | 1092.8 | 1.0 |
| ES 13 | 38 | | 1 | | 396.9 | 2.9 |
| ES 14 | 54 | | | 1 | 551.6 | 3.0 |
| ES 15 | 55.9 | | | 1 | 739.0 | 2.3 |
| ES 16 | 38 | | 1 | | 521.4 | 2.2 |
| ES 17 | 38 | | 1 | | 454.3 | 2.5 |
| ES 18 | 36 | | 1 | | 229.2 | 4.8 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Comparativo en las ES 1 y ES 6 de la situación actual y resultados obtenidos con optimización a través de LINGO V.11

| Modelo | Estación de Servicio | Costos mensuales | | |
|--------------|----------------------|-------------------|---------------------|----------------|
| | | Costos de ordenar | Costos de almacenar | Costos totales |
| Optimización | 1 | \$3,073.51 | \$3,000.00 | \$6,073.51 |
| Empírico | 1 | \$6,510.04 | \$5,838.31 | \$12,917.10 |
| Optimización | 6 | \$1,368.14 | \$4,500.00 | \$5,868.14 |
| Empírico | 6 | \$3,102.42 | \$11,526.30 | \$13,603.04 |

Fuente: Elaboración Propia

6. CONCLUSIONES

En este proyecto se modeló un programa de optimización y después fue resuelto con el “software” LINGO V.11 para optimizar una red de distribución actual de una empresa que distribuye cierto tipo de combustible que opera al norte de la ciudad de México. La empresa deseaba saber si la inclusión de flota heterogénea aminoraba los costos totales, los cuales incluyen los costos de inventario y distribución. El modelo matemático arroja que se debe utilizar una flota heterogénea ya que logra ahorros del 47% y 43% en las estaciones de servicio 1 y 6 respectivamente con la solución propuesta.

Se logra una calendarización determinística, se identifica el tipo de vehículo con el que se debe abastecer el combustible, se respetan las capacidades de las ES y la de los vehículos y se satisface la demanda. Para futuras propuestas, se puede hacer variar el tipo de flota por periodo, ya que en este caso se mantuvo fijo. Es decir, para la ES 1 se sugiere el tipo de vehículo 1; sin embargo, para una variación en la demanda (demanda estocástica) se puede cambiar el tipo de flota en diferentes meses, lo cual se piensa que podría reducir aún más los costos totales.

REFERENCIAS

- AMBROSINO, D., SCIOMACHENA, A. Y SCUTELLÁ, M. G. (2009). *A heuristic based on multi-exchange techniques for a regional fleet assignment location routing problem*. Computer Operations Research 36, 442 – 460. doi; 10.1016/j.cor.2007.09.012.
- BENÍTEZ MONTALVO, R.I. (2012). *Influencia de los costos de mantenimiento en la toma de decisiones*. La Habana: Centro de Inmunología Molecular.
- COELHO, L.C., COREDEAU, J. F. Y LAPORTE, G. (2012). *Thirty Years of Inventory – Routing*. CIRRELT – 2012-52. Interuniversity Research Centre on Enterprise Networks, Logistics and Transportation.
- EDELSBRUNNER, H. (2014). *A Short Course in Computational Geometry and Topology*. Springer. ISBN 978-3-319-05956-3.
- FORTUNE, S. (1986). *A sweepline algorithm for Voronoi diagrams*. Proceedings of the second annual symposium on Computational geometry. Yorktown Heights, New York, United States, pp. 313–322.
- GALLIER, J. (2011). *Geometric Methods and Applications for Computer Science and Engineering*. Texts in Applied Mathematics 38., Springer. ISBN 978-1-4612-6509-2, pp. 301-319.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI (2016). www.inegi.gob.mx Fecha de consulta: 26 de mayo 2016.
- LINGO (2016). www.Lingo.com
- OKABE, A., BOOTS, B., SUGIHARA, K. Y NOK CHIU, S. (1945). *Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagram*. John Wiley & Sons Ltd.

SECRETARÍA DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA, SEDUVI (2016). *Programa Delegacional de Desarrollo Urbano en Azcapotzalco. Zonificación y norma de ordenación.* Recuperado de:

http://www.seduvi.df.gob.mx/portal/docs/programas/programasdelegacionales/PLANO-DIVULGACION_PDDU_AZCAPOTZALCO.pdf

STEER DAVIES GLEAVE (2011). *Análisis de costos y competitividad de modos de transporte terrestre de carga interurbana.* Informe final presentado a la Subsecretaría de Transporte, Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, Chile, 162 p.

TAWFIK L., CHAUVEL M. (1993). *Administración de la producción.* Mc GRAW-HILL, México. 404 p.

WELLENS A., SEGURA PÉREZ E., TELLO GAETE D., GÓMEZ GALLARDO W. (2017). *Optimization and Simulation of Fuel Distribution. Case Study: Mexico City.* In Applied Simulation and Optimization 2. Springer International Publishing AG. ISBN 978-3-319-55809-7.

22 Propuesta para la distribución de cerveza en el centro histórico de Coyoacán

Luis Reynaldo Mota Santiago

Angélica Lozano

Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN

Las empresas utilizan buena parte de sus recursos en la búsqueda por alcanzar dos de sus objetivos fundamentales: satisfacer las necesidades de sus clientes y tener mayor presencia en el mercado. La distribución urbana de mercancías (DUM) tiene el gran reto de cumplir con estos objetivos, sobre todo porque en un área urbana los vehículos de distribución tienen que compartir y competir por el espacio público con el resto de los vehículos.

Este trabajo presenta un procedimiento para determinar “las mejores” rutas de distribución, mediante el análisis de un conjunto de escenarios y tomando en cuenta varios criterios. Además, se presenta la aplicación de este procedimiento al caso de estudio de la distribución de cerveza en el Centro Histórico de Coyoacán (Ciudad de México), considerando los criterios siguientes: la distancia recorrida, el tiempo de recorrido, el impacto ambiental (emisiones de CO_2) y el costo de operación.

Palabras clave: Distribución urbana de mercancías, rutas de vehículos, análisis con varios criterios.

1. INTRODUCCIÓN

Rojas, et al. (2011) al igual que otros autores, ponen de manifiesto que el transporte de mercancías siempre ha sido un factor fundamental para las actividades económicas y un detonante del desarrollo regional. En la actualidad la distribución urbana de mercancías (DUM) es la última etapa en la cadena de suministro, también conocida como logística de última milla, la cual involucra principalmente los movimientos relacionados con el desarrollo de las actividades comerciales (Antún, 2013).

La logística urbana ha evolucionado desde su concepción como la actividad de llevar mercancías de un punto a otro dentro de una zona urbana hasta incluir elementos más complejos como satisfacer la demanda de manera eficiente y con el mínimo impacto en el medio ambiente.

Cada área urbana es única, lo que implica que sus operaciones de carga asociadas también son únicas, por lo que no pueden ser transferidas íntegramente a otros lugares y esperar tener

los mismos resultados (Ogden, 1992).

Dado que el transporte urbano de mercancías a menudo se lleva a cabo en zonas con alta densidad de población con uso mixto del espacio público, frecuentemente se enfrenta a problemas de accesibilidad, al tiempo que contribuye a generar problemas ambientales, de tránsito y de seguridad. La corrección de cualquier externalidad negativa puede llevarse a cabo considerando conjuntamente tanto los beneficios producidos como los efectos adversos provocados (De Rus, et al., 2003).

Ante esta situación, el Problema de Rutas de Vehículos (VRP) ha generado gran interés, por lo que se han desarrollado diversos modelos y técnicas de solución que incluyen diferentes objetivos y restricciones para representar los problemas. Por lo general, el objetivo de un problema del tipo VRP es minimizar el tiempo o la distancia recorrida, aún cuando los problemas reales de distribución urbana de mercancías son multicriterio; es aquí donde el presente trabajo busca generar una aportación.

2. PROCEDIMIENTO PROPUESTO

El objetivo de este trabajo es presentar un procedimiento para determinar las “mejores” rutas de distribución de mercancías, que se basa en el análisis de un conjunto de escenarios y una selección multicriterio del mejor escenario.

Los pasos a seguir son los siguientes:

1. Obtener información sobre las características del producto (mercancía) y las condiciones para su manejo y transportación.
2. Delimitar y caracterizar la zona de distribución.
3. Determinar las condiciones de entrega a los clientes y la demanda del producto en cada punto de demanda.
4. Generar información geográfica requerida para el modelo (red vial, ubicación de establecimientos, etc.)
5. Determinar el modelo de ruta de vehículos que mejor represente al problema.
6. Proponer escenarios que contemplen las posibles condiciones para la generación de las rutas de distribución.
7. Establecer los criterios de selección para las “mejores” rutas.
8. Obtener las mejores rutas para cada uno de los escenarios.
9. Calcular los valores de los criterios de cada una de las rutas obtenidas en cada escenario, para realizar la comparación de acuerdo con los criterios establecidos.
10. Seleccionar la mejor opción con base en los criterios establecidos.

Para llevar a cabo el procedimiento se recomienda realizar de forma simultánea algunos pasos tal como se indica en la secuencia mostrada en la Figura 1.

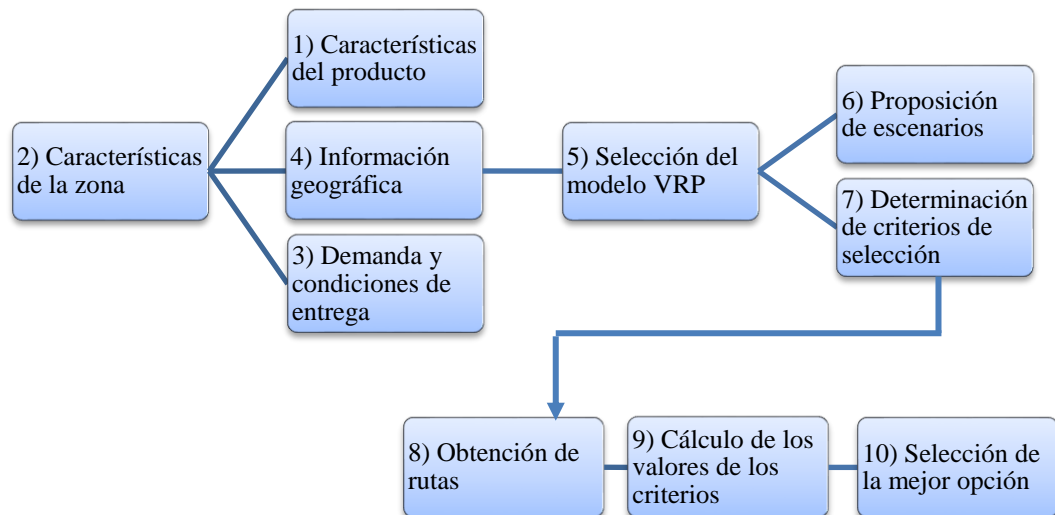


Figura 1. Diagrama con la secuencia de pasos del procedimiento

Fuente: Elaboración propia

Los primeros cuatro pasos del procedimiento tienen como finalidad la obtención y generación de información relevante para el proceso de distribución y pueden ser realizados de forma simultánea.

En el Paso 1 se recaba información referente al producto, dado que las mercancías pueden dar origen a importantes restricciones para su distribución, por lo que es importante considerar aspectos como dimensiones, peso, requerimientos para su adecuada conservación (temperatura, exposición a la luz, caducidad, etc.), reglamentos para su manejo, características de los vehículos que serán utilizados, entre otros. El siguiente paso debe ser el Paso 3 ya que consigna la información referente a los clientes en el entendido de que cada uno de ellos puede tener necesidades diversas, tanto en la cantidad de la mercancía que requiere (demanda) como en las condiciones en las que deberá ser entregada, por ejemplo, horario (ventanas de tiempo) y número de entregas por pedido (ruptura de carga).

El Paso 2 responde a la necesidad de conocer las características de las vialidades tales como dimensiones, tipo de pavimento, reglamentaciones, infraestructura urbana, limitaciones de horario, entre otras, que dan origen a restricciones para la circulación y accesibilidad de los vehículos que se pretende utilizar. A continuación, en el Paso 4 se genera información geográfica a partir de la información obtenida; la información geográfica debe incluir al menos la red vial de la zona y la ubicación de los establecimientos y de las instalaciones desde donde saldrá el embarque.

Posteriormente, en el Paso 5 se determina la variante del VRP que representa mejor el problema de estudio (sin considerar aún los criterios), con base en la revisión de la literatura. Entonces, se llevan a cabo los Pasos 6 y 7 de forma simultánea; en el primero se plantea la solución del problema, generando tantos escenarios diferentes como sea necesario a partir

de la variación de características relevantes tales como horarios de entrega, inclusión de centros de distribución (CeDis) intermedios, tipo de vehículos, entre otros; en el segundo se determinan los criterios que serán considerados en la comparación final de resultados, así como su conversión a costo monetario.

El Paso 8 consiste en resolver el problema y obtener las mejores rutas para cada uno de los escenarios del Paso 6, con el objetivo de minimizar el tiempo y la distancia recorrida para obtener dos soluciones para cada escenario.

Una vez obtenidas las mejores rutas se realiza el cálculo, para cada una de ellas, de los valores correspondientes a cada uno de los criterios.

Finalmente se selecciona la mejor opción para realizar las entregas, con base en la comparación criterio por criterio, eliminando escenarios en cada comparación.

Aplicación al caso de estudio

Para ilustrar la aplicación del procedimiento antes descrito, se presenta la distribución de cerveza en bares y restaurantes del Centro Histórico de Coyoacán. Se seleccionó esta zona de estudio debido a que es un ícono para la Ciudad de México: está catalogada como barrio mágico, combina la actividad como sede del Gobierno Delegacional con su intensa vida social, cultural, nocturna y su atractivo turístico; es un sitio de gran diversidad culinaria (bares, restaurantes de comida típica mexicana e internacional, etc.) y de intensa actividad comercial que se ha convertido en un polo económico.

Información relevante para la distribución

El producto a distribuir es cerveza, con presentación en un envase de vidrio de 355 ml, que se transporta en cajas de cartón con 12 botellas cada una, se estiban agrupadas en pallets de aproximadamente 96 cajas; preferentemente debe ser conservada a temperaturas no mayores a 12°C evitando en la medida de lo posible su exposición a la luz del sol.

Los vehículos utilizados para llevar a cabo las entregas desde el Centro de Distribución (CeDis) hasta los puntos de demanda, tienen una capacidad de carga de seis u ocho “pallets” en función de su configuración y utilizan motores de combustión interna.

La zona de estudio se encuentra delimitada por vialidades primarias, en cuyo polígono se concentran los establecimientos en que puede ser comercializado el producto. En la zona se puede observar la conjunción de diferentes etapas históricas en la evolución de la Ciudad, desde la época virreinal hasta la actual, por lo que existen diferentes vialidades acordes a los modos de transporte de cada etapa y que presentan características físicas específicas como en el caso de los tipos de pavimentos (Figura 2).

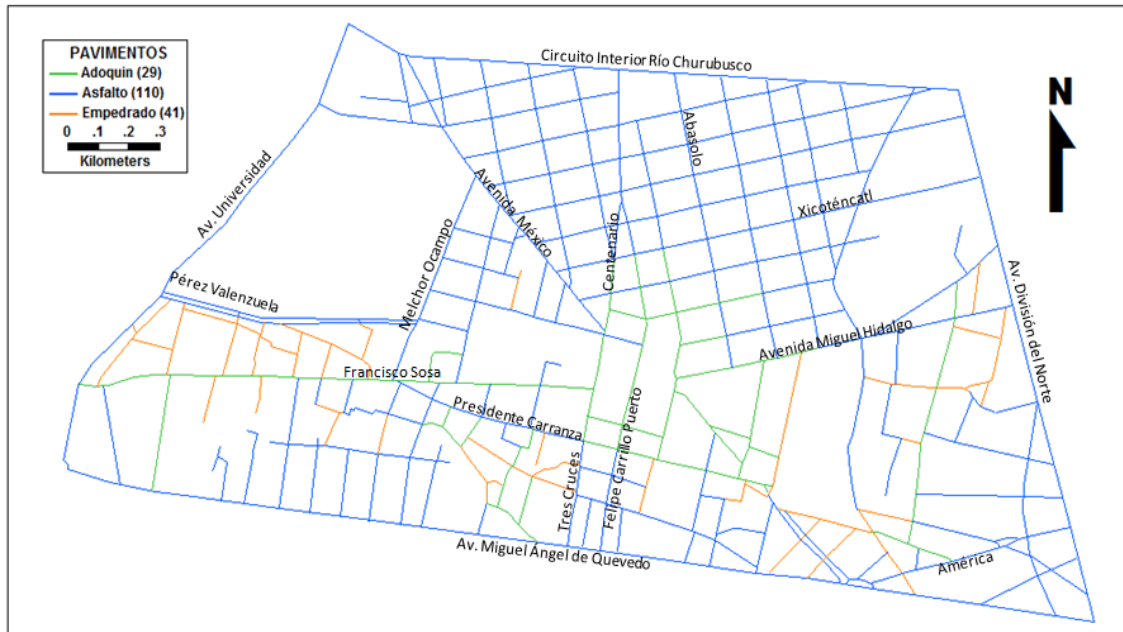


Figura 2. Red vial y distribución de tipos de pavimentos

El Centro Histórico de Coyoacán cuenta con una gran riqueza cultural e histórica, además de una importante gama de servicios entre los que se encuentran atractivos inmuebles históricos, religiosos, artísticos y culturales, bellas plazas, jardines y una importante zona comercial; además cuenta con una cantidad importante de oficinas de gobierno y otros servicios.

La falta de espacios de estacionamiento es un problema más que evidente debido a la transición en el uso de suelo, de habitacional a comercial y de servicios, lo que ha incrementado significativamente la demanda de éstos, especialmente los fines de semana. Además la zona no cuenta con infraestructura específica para llevar a cabo operaciones de carga y descarga de mercancías; algunos operadores toman la determinación de estacionarse, aun cuando no esté permitido, en lugares cercanos a los puntos de distribución para llevar a cabo las labores propias del reparto de sus productos. Como consecuencia de esto, los problemas de congestión se incrementan en determinados horarios y segmentos de la red. Cabe señalar que no existe regulación oficial alguna que restrinja los horarios para la distribución y recolección de mercancías en la zona a algún tipo de vehículo.

Fueron considerados 63 establecimientos en los que se puede comercializar el producto: 52 restaurantes, 10 bares y cantinas, y un billar; cada uno de ellos presenta diferentes niveles de demanda y condiciones de entrega. La demanda varía en cada establecimiento principalmente en función de su giro comercial, mientras que las condiciones de entrega dependen principalmente de las características del local comercial. Se estimó una demanda total diaria de 374 cajas.

Algunos establecimientos cuentan con un acceso para la recepción de mercancías por parte de proveedores, independiente a la entrada para los clientes, por lo que recibir el producto no representa mayor inconveniente mientras tengan la cerveza en el momento que los comensales la soliciten. Existen otros locales que tienen una entrada única, en la que reciben los productos que comercializan y a sus clientes, por lo que no es recomendable que la cerveza sea entregada durante el horario de atención a éstos.

El tiempo de servicio se encuentra conformado por el tiempo promedio requerido para estacionar el camión en el lugar donde se llevan a cabo las maniobras de descarga del producto y carga de los envases vacíos, además del tiempo necesario para el manejo y entrega de cada caja de forma individual así como de la recepción y papeleo correspondiente.

Se generó información geográfica en forma de capas con la información relevante previamente obtenida (Figura 3). La capa puntos de demanda considera los establecimientos antes mencionados, los cuales fueron simplificados mediante la agrupación de los puntos muy cercanos y con ventanas de tiempo iguales. La capa CeDis contiene el punto donde se encuentra el Centro de Distribución actual fuera de la zona de estudio, al oriente de ésta.

Para la red, se consideró que no es posible que el vehículo de distribución circule en todas las vialidades que conforman la red debido a limitaciones de los arcos, tales como el ancho de vía y el tipo de pavimento, lo que dio como resultado la utilización de una red simplificada en la que solo se consideran las vialidades adecuadas.



Figura 3. Capas geográficas generadas (red vial, puntos de demanda y CeDis)

Clasificación del problema

Con base en la información anterior, se llevó a cabo la revisión de la literatura, tomando en cuenta que el problema abordado en el caso de estudio tiene las características siguientes:

- el número de paradas es conocido,
- no se permite división de la carga,
- la demanda por parte del cliente está previamente definida (determinística),
- el tiempo de servicio es determinístico,
- las ventanas de tiempo son rígidas,
- la red de transporte es dirigida,
- los clientes se encuentran en los nodos,
- hay un solo centro de abastecimiento,
- las ventanas de tiempo corresponden a los clientes,
- los vehículos están restringidos en su capacidad y son de características similares,
- el costo de transporte depende de la distancia,

y determinando con base en la recopilación hecha por Eksioglu et, al. (2009), que el modelo del Problema de Rutas de Vehículos con Ventanas de Tiempo (VRP-TW) representa al problema de distribución de cerveza en el Centro de Coyoacán, considerando que solamente se tuviera un objetivo.

Existen dos tipos de cliente, es decir restaurantes y bares, que tienen horarios de servicio distintos y que requieren tener el producto antes de su hora de apertura al público, por lo que es importante cumplir con las entregas dentro de las ventanas de tiempo establecidas.

3. PLANTEAMIENTO DE ESCENARIOS

Los escenarios planteados fueron agrupados en dos, para los del primer grupo se considera que las rutas inician en el CeDis actual y que se utilizan vehículos de combustión interna. Para los del segundo grupo se evita que todos los vehículos salgan y tengan que regresar al CeDis, debido a que éste está lejos de la zona de estudio, por lo que se asume la existencia de vehículos eléctricos que realicen la distribución a partir de una bodega ubicada dentro de la zona de estudio, y que los viajes entre el CeDis y la bodega se realice con vehículos de combustión interna a horas de baja congestión.

Los escenarios analizados son los siguientes:

- Grupo 1: Rutas de distribución a partir del Centro de Distribución (CeDis).
 - A. Una ruta sin restricciones,
 - B. Dos rutas con ventanas de tiempo,
 - C. Tres rutas, dos matutinas y una vespertina, con ventanas de tiempo, y
 - D. Entregas nocturnas.

- Grupo 2: Rutas de distribución a partir de la bodega propuesta.
 - E. Tres rutas, dos matutinas y una vespertina, con ventanas de tiempo, y
 - F. Entregas nocturnas.

Para cada uno de los escenarios generales se consideraron, de manera separada, los objetivos siguientes: 1) minimizar el tiempo de recorrido, y 2) minimizar la distancia recorrida. Cada escenario es identificado con la letra del escenario general y el número del objetivo.

En los escenarios A1 y A2 solo se utiliza una ruta de distribución sin considerar ventanas de tiempo de los establecimientos; en los escenarios B1 y B2 se contemplan las ventanas de tiempo para la generación de las rutas; en los escenarios C1 y C2 se agrupan los establecimientos de acuerdo a la ventana de tiempo de cada uno y son asignados por horario, matutino y vespertino; en los escenarios D1 y D2 se seleccionan los establecimientos en los que es posible realizar entregas nocturnas.

En los escenarios E1 y E2 se agrupan los establecimientos de acuerdo a la ventana de tiempo de cada uno, así se asignaron en horarios matutino o vespertino; en los escenarios F1 y F2 se seleccionan los establecimientos en los que es posible realizar entregas nocturnas.

Para los escenarios E1, E2, F1 y F2 se considera una ruta adicional para llevar la cerveza desde el CeDis hasta la bodega propuesta e ir de regreso al CeDis. Esta ruta utiliza un camión cuya capacidad permite transportar al menos el número de cajas a entregar en un día en toda la zona, y no importa el horario en que se lleve a cabo la entrega en la bodega, siempre y cuando no afecte la distribución a los establecimientos. Esta ruta fue calculada de manera independiente y posteriormente fue incluida en los escenarios.

4. CRITERIOS DE SELECCIÓN

Por lo general, los objetivos en el problema VRP-TW son el tiempo o la distancia recorrida. En este caso de estudio se incluyen adicionalmente el costo de operación diario estimado en las rutas y las emisiones de CO_2 ; este último es un factor que consideran las empresas y que en los últimos años ha tenido un gran auge ante la creciente conciencia ecológica, lo que ha influido a que se busquen opciones más amigables con el medio ambiente.

Para los escenarios descritos en el apartado anterior, se obtuvieron las mejores rutas mediante un Sistema de Información Geográfica para el Transporte (SIG-T).

Una primera comparación de escenarios, consistió en determinar la mejor opción entre escenarios similares con diferente objetivo (por ejemplo A1 y A2, o bien E1 y E2).

Una vez obtenidas las “mejores” rutas para los escenarios generales A a F, fueron calculados los valores de las emisiones con base en la Ecuación 1 (CICC, 2011)

$$Emisiones CO_2 = \frac{distancia}{Factor\ de\ consumo} Factor\ de\ emisión \quad (1)$$

Para los vehículos eléctricos fue considerado un factor de emisión relativo a la mezcla de combustibles empleados en la generación de electricidad distribuida por el Sistema Eléctrico Nacional de $0.4946 \frac{kg\ CO_2}{kWh}$ (SEMARNAT, 2010), y un consumo estimado de $4.5 \frac{km}{kWh}$; para los vehículos diésel fue considerado un factor de emisión de $2.61 \frac{kg\ CO_2}{l}$ (CICC, 2011) y un consumo estimado de $3.5 \frac{km}{l}$.

El costo de operación diario fue calculado con base en las Ecuaciones 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8:

$$Costo\ de\ Operación_{estimado} = Costo\ diario_{V.D.} + Costo\ diario_{V.E.} + Salarios_{diarios} + Costo_{emisiones} + Costo_{combustible} + Costo_{energía} \quad (2)$$

Donde:

$$Costo\ diario_{V.D.} = \#Vehículos_{diésel} \times Costo\ Renta_{diaria\ V.D.} \quad (3)$$

$$Costo\ diario_{V.E.} = \#Vehículos_{eléctricos} \times Costo\ Renta_{diaria\ V.E.} \quad (4)$$

$$Salarios_{diarios} = \#Personas \times Salario_{diario} \quad (5)$$

$$Costo_{emisiones} = Emisiones_{CO_2} \times Costo\ Bono\ de\ Carbono_{kg\ CO_2} \quad (6)$$

$$Costo_{combustible} = Consumo\ diario_{l\ diésel} \times Costo\ por\ litro_{diesel} \quad (7)$$

$$Costo_{energía} = Consumo\ diario_{KWh} \times Costo\ por\ kWh \quad (8)$$

Para determinar el costo diario por el uso de los camiones se consideró que el costo aproximado del vehículo eléctrico es de US\$14,000 mientras que el del vehículo diésel ronda en los US\$55,000; con ello se obtuvo el precio de renta diario de un camión diésel de características similares a los utilizados en la distribución del producto, de \$2,132.00 (READYTORENT, 2015), para obtener el precio de renta diario para un vehículo eléctrico se consideró una proporción similar entre el valor del vehículo diésel y el de renta por día, lo que da un valor de \$542.00.

Se consideró un salario mensual promedio tanto para el operador del vehículo como para su ayudante, encargado de realizar las entregas, de \$5,000.00 (Indeed, 2015) y considerando que un mes tiene en promedio 24 días laborables, correspondería a un salario diario de \$208.33, valor que se consideró razonable comparado con el salario mínimo profesional de \$104.55 por día correspondiente al rubro de chofer de camión de carga en general (STPS,

2015).

En lo referente al costo por producción de emisiones de CO_2 , se consideró el valor de los bonos de carbono, el cual corresponde al costo por emitir una tonelada (1000 kg) de CO_2 a la atmósfera, al que le corresponde un valor de €6.45 (Investing, 2015), equivalente a \$111.68, lo que da un valor equivalente de \$0.11 por kg de CO_2 emitido.

El costo del litro de diésel fue considerado en \$14.20 (AMEGAS, 2015) y el kWh en \$2.79 (CFE, 2015), precio que corresponde a la tarifa comercial.

Una vez generada la información necesaria, se realizó la comparación de los escenarios con base en los cuatro criterios establecidos (tiempo, distancia recorrida, emisiones de CO_2 y costo estimado de operación), con el objetivo de determinar el escenario con las mejores rutas para llevar a cabo la distribución del producto.

5. RESULTADOS OBTENIDOS DEL CASO DE ESTUDIO

Al realizar el análisis de los escenarios mediante un SIG-T se obtuvieron las mejores rutas para cada uno de ellos, para el primer grupo se obtuvieron rutas como las que se ilustran en la Figura 4. La Figura 5 muestra la ruta adicional para el abastecimiento de la bodega propuesta, y la Figura 6 ejemplifica las rutas obtenidas para el segundo grupo de escenarios.

En conjunto con los itinerarios de las rutas se obtuvieron los valores del tiempo de recorrido y la distancia recorrida en cada una de ellas; a partir de éstos se obtuvieron el tiempo total, el tiempo promedio por ruta y la distancia recorrida en cada escenario, lo que permitió llevar a cabo la primera comparación.

En una primera comparación de los escenarios generales, se seleccionaron las rutas de distribución con el mínimo tiempo y la mínima distancia recorridos. En esta comparación de pares de escenarios, siempre hubo un escenario dominante en ambos criterios.

Posteriormente fueron calculados los valores de los criterios adicionales para los escenarios hasta ahora dominantes. Los valores de todos los criterios para estos escenarios son mostrados en la Tabla 1. Los escenarios entonces fueron comparados criterio por criterio, eliminando los dominados.

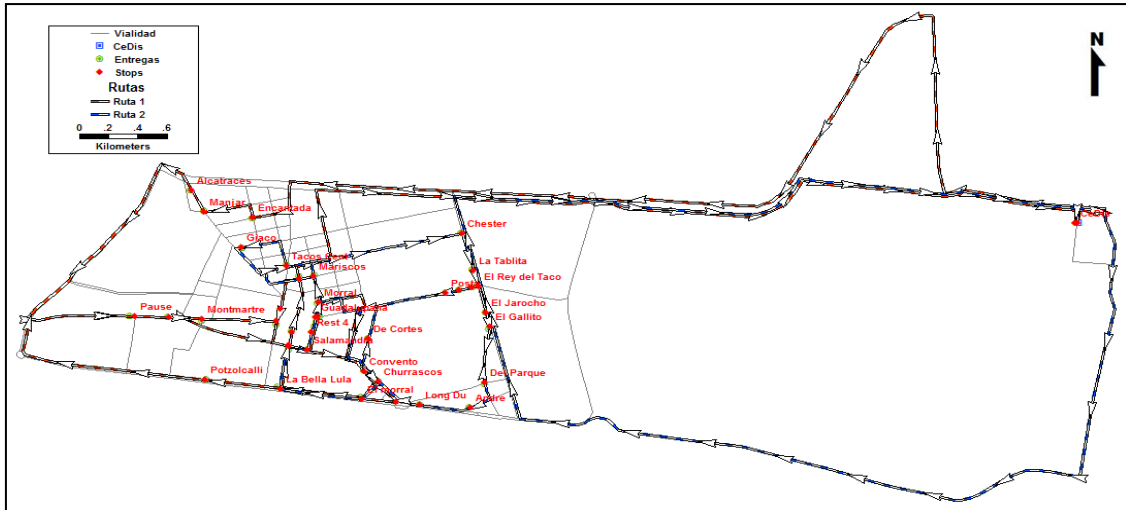


Figura 4. Ejemplo de rutas obtenidas para los escenarios del primer grupo (Escenario B1)



Figura 5. Ruta para el abastecimiento de cerveza a la bodega propuesta

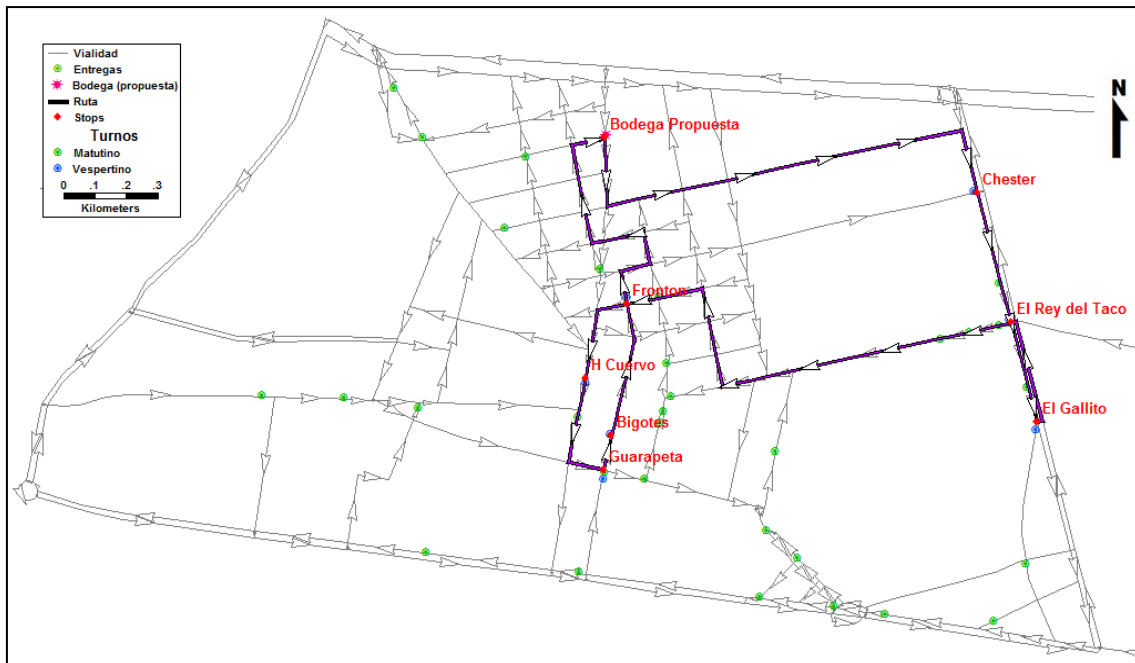


Figura 6. Ejemplo de ruta obtenida para los escenarios del segundo grupo (Escenario E2)

Tabla 1. Valores considerados de las mejores rutas para cada escenario general

| Id | Origen | Escenario | Distancia (km) | Tiempo (h) | Tiempo promedio | Emisiones (kg-CO ₂) | Costo de Operación estimado |
|----|------------------|--|----------------|------------|-----------------|---------------------------------|-----------------------------|
| A | | Una ruta | 27.03 | 09:34 | 09:34 | 20.157 | \$2,660.55 |
| B | | Dos rutas | 46.29 | 12:57 | 06:28 | 34.519 | \$5,288.94 |
| C | CeDis | Tres rutas, dos horarios | 62.24 | 12:18 | 04:06 | 46.413 | \$7,903.62 |
| D | | Tres rutas, dos horarios, entregas nocturnas | 63.46 | 11:51 | 03:57 | 47.323 | \$7,908.67 |
| E | | Tres rutas, dos horarios | 37.09 | 12:27 | 03:19 | 9.589 | \$5,478.52 |
| F | Bodega Propuesta | Cuatro rutas, dos horarios, entregas nocturnas | 40.32 | 12:27 | 02:29 | 9.944 | \$5,355.23 |

Se consideró al tiempo de recorrido como primer criterio de selección, observando que en lo referente al tiempo promedio de recorrido de las rutas, los escenarios mostraron tiempos menores a las 8 horas, excepto el escenario A, correspondiente a la realización de las entregas mediante una ruta con origen en el CeDis, que lleva a cabo su recorrido en 9 horas 34 minutos. Este escenario excede la jornada laboral de 8 horas, además no considera las ventanas de tiempo correspondientes a las entregas y no tiene tiempos de espera que pudiesen ser utilizados para satisfacer necesidades básicas de los trabajadores como alimentación e ir al baño, razones por las cuales el escenario A fue desestimado.

Como segundo criterio de selección se consideró a la distancia recorrida, así los escenarios C y D presentaron recorridos totales más largos en alrededor del 50% respecto a los recorridos realizados en los escenarios B, E y F. Al utilizar vehículos de combustión interna en los escenarios C y D, se tuvo mayor requerimiento de combustible para llevar a cabo la distribución del producto. Por estas razones, los escenarios C y D fueron desestimados.

Las emisiones de CO₂ fueron consideradas como el tercer criterio de selección. La utilización de vehículos eléctricos en los escenarios E y F permitió obtener una reducción de prácticamente el 70% de las emisiones del escenario B, razón por la cual este último escenario fue desestimado.

Finalmente, la estimación del costo diario de operación fue considerada como el cuarto criterio de decisión. Se observa que el escenario F ofrece un costo de operación menor en \$123.29 respecto al ofrecido por el escenario E, razón por la cual el escenario E fue desestimado.

Con base en lo anterior se encontró que para llevar a cabo la distribución del producto de acuerdo con los criterios señalados, el escenario más favorable es el F, que corresponde al de *“cuatro rutas, dos horarios, entregas nocturnas con origen en una bodega propuesta”*.

6. CONCLUSIONES

El procedimiento propuesto permite determinar las mejores rutas para la distribución de mercancías, proporcionando mayor información a los tomadores de decisiones al considerar criterios adicionales a los tradicionalmente referidos en la literatura, acordes a las necesidades y condiciones específicas de la distribución.

Con la aplicación al caso de estudio, se consideraron condiciones reales, y se determinaron las “mejores” rutas para la distribución de cerveza. Para obtener las rutas de distribución de otros productos que presenten condiciones similares para su entrega, se deberá evaluar si se requiere determinar criterios de selección adicionales o diferentes.

En la zona de estudio son pocos los establecimientos que cuentan con accesos de servicio

para recibir a sus proveedores, por tanto, las ventanas de tiempo adquieren mayor relevancia aun cuando los factores de carga para algunos vehículos de combustión interna considerados en los escenarios sean menores al 50% de su capacidad.

Los escenarios que consideran la bodega propuesta permiten reducir significativamente el tiempo y la distancia de recorrido, en comparación con los escenarios que consideran solo CeDis. La utilización de vehículos eléctricos representa una mejor opción en comparación con la utilización de vehículos de combustión interna al generar menores emisiones de CO_2 .

Después de realizar la comparación de escenarios con base en los criterios, se determinó que la mejor opción para la distribución de cerveza en el Centro Histórico de Coyoacán es la que considera utilizar: la bodega propuesta, una ruta troncal con un vehículo de combustión interna que permita llevar los productos desde el CeDis hasta la bodega y cuatro rutas con vehículos eléctricos para realizar las entregas en los establecimientos de la zona de estudio, dos de ellas en horario nocturno.

Llevar a cabo la distribución de productos de esta manera representa una buena alternativa para disminuir la congestión vehicular en horarios de alta afluencia al permitir trasladar parte de la actividad de los vehículos a horarios en que la congestión ha disminuido considerablemente, inclusive en fines de semana en donde la vida nocturna de la zona es intensa. Para los recorridos nocturnos, al reducirse la congestión en las vialidades debido al horario, se agiliza la circulación de los vehículos y se facilita que pudieran estacionarse en lugares más próximos a los establecimientos sin causar afectaciones negativas significativas aun cuando no se cuente con espacios específicos para realizar las operaciones de carga y descarga. Para los recorridos diurnos, al utilizar vehículos de menor tamaño, se reduce la contribución a la congestión ocasionada por las actividades de distribución. Finalmente el traslado de los productos desde el CeDis hasta la bodega propuesta no requiere ser realizado en un horario específico, siempre y cuando los productos estén disponibles para cubrir la demanda de cada una de las rutas de distribución, por lo que pueden llevarse a cabo en horario nocturno.

REFERENCIAS

- ANTÚN, J.P. (2013). *Distribución urbana de mercancías*. Vol. 56 de Serie Docencia. Ciudad de México: Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 148 p.
- ASOCIACIÓN MEXICANA DE EMPRESARIOS GASOLINEROS A.C., AMEGAS (2015). *Aumento de precios para el 2015*. [En línea]. México: Asociación Mexicana de Empresarios Gasolineros A.C. 2015. [Fecha de consulta: 19-03-2015]. Disponible en <http://www.amegas.net/PRECIOS.pdf>.
- BOLSA DE TRABAJO – INDEED. (2015). *Ofertas de trabajo; empleos de chofer*. [En línea]. México. [Fecha de consulta: 19-03-2015]. Disponible en

<http://www.indeed.com.mx/>.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD, CFE. (2015). *Conoce tu tarifa*. [En línea]. México: Comisión Federal de Electricidad. 2015. [Fecha de consulta: 19-03-2015]. Disponible en

http://app.cfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp.

COMISIÓN INTERSECRETARIAL DEL CAMBIO CLIMÁTICO, CICC. (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de efecto invernadero (GEI)*. Versión de marzo. Generalitat de Catalunya. España. 66 p.

DE RUS, G., et al. (2003). *Economía del Transporte*. Barcelona: Antoni Bosch. 240p.

EKSIOGLU, B., et al. (2009). *The Vehicle Routing Problem: A taxonomic review*. Computers & Industrial Engineering, 57: 1472 – 1483.

FUSION MEDIA LTD - Investing.com (2015). *Emisiones de Carbono futuros– Dec 15, información histórica*. [En línea]. Estados Unidos: Fusion Media Ltd. 2015, [Fecha de consulta: 11-03-2015]. Disponible en <http://mx.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data>.

OGDEN K. W. (1992). *Urban Goods Movement. A guide to policy and planning*. Vermont: Ashgate Publishing Company. 397 p.

READY TO RENT – READYTORENT. (2015). *Camiones extra para tu negocio, Cotizador*. [En línea]. México: Ready to Rent. [Fecha de consulta: 12-03-2015]. Disponible en <http://readytorent.force.com/Cotizador>

ROJAS LÓPEZ, M.D. et al. (2011). *Logística Integral, una propuesta práctica*. Bogotá: Ediciones de la U. 2011. 227 p.

SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, SEMARNAT (2010). *Programa GEI México; Factor de emisión eléctrico 2013*. [En línea]. México: Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. [Fecha de consulta: 25-02-2015]. Disponible en <http://www.geimexico.org/factor.html>.

SECRETARÍA DEL TRABAJO Y PREVISIÓN SOCIAL, STPS. (2015). *Comisión Nacional de los Salarios Mínimos, Salarios Mínimos*, [En línea] México: Secretaría del Trabajo y Previsión Social. [Fecha de consulta: 10-03-2015]. Disponible en http://www.conasami.gob.mx/pdf/tabla_salarios_minimos/2015/01_01_2015.pdf.



23 Alternativas de solución para el Sistema de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos de la Delegación La Magdalena Contreras

Zaida Estefanía Alarcón Bernal

Ricardo Aceves García

Omar Rivas Martínez

Universidad Nacional Autónoma de México, México

RESUMEN

Una de las consecuencias del crecimiento demográfico en la Ciudad de México es la contaminación por residuos sólidos urbanos (RSU). En particular, la recolección de los RSU en la Delegación La Magdalena Contreras se ha desarrollado sin ningún conocimiento técnico, mostrando importantes deficiencias en la ejecución, lo que representa un mal servicio y usuarios insatisfechos. El objetivo de este trabajo consiste en proponer cambios estratégicos en el conjunto de rutas de recolección de RSU en la Delegación La Magdalena Contreras, que mejoren la cobertura del servicio. Para ello, se usan modelos matemáticos como el del agente viajero y de localización en redes.

Palabras clave: Redes, localización de servicios, recolección de residuos sólidos urbanos.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población en México ha desencadenado una gran diversidad de problemas. Específicamente, una de las consecuencias del crecimiento demográfico es la contaminación por residuos sólidos urbanos (RSU).

En la Ciudad de México (CdMx) la generación promedio per cápita de RSU al 2014 fue de 1.5 kg/hab/día (SEDEMA, 2014). La CdMx se divide en 16 delegaciones que desarrollan los trabajos de manejo integral de RSU con programas, personal y equipos propios. La recolección es la tarea más importante en términos del costo, ya que representa entre el 70 y el 85 % del costo total de manejo de RSU (SEDESOL, 2004).

La recolección de los RSU en la Delegación La Magdalena Contreras muestra deficiencias tales como quejas constantes sobre el servicio, acumulación de residuos en algunas colonias, incertidumbre de los habitantes por no saber la hora a la que pasará la unidad recolectora y zonas que no tienen servicio porque son de reciente crecimiento.

Las rutas, que constituyen uno de los instrumentos más sensibles para la mejora del

servicio, no tienen un diseño estructurado y tampoco se han actualizado para ajustarlas en función de los nuevos asentamientos sociales de la demarcación, generando entre otras, las consecuencias citadas.

El modelado de la administración de RSU no es una idea nueva. Desde la década de 1970 se han desarrollado modelos, al respecto en Morrissey y Browne (2004), se presenta una interesante revisión de la literatura. Los primeros modelos ven la administración de los residuos sólidos a un nivel sistémico. Durante la década de 1990 se incorporaron métodos distintos para su manejo, como el reciclaje. Actualmente los modelos se dirigen hacia su manejo integral, considerando principalmente aspectos económicos y medio ambientales.

Los trabajos en este tema tienen características importantes dependiendo de la región en la que se desarrollaron. Generalmente se trata de modelos de optimización de los procesos en los países industrializados, mientras que en las economías emergentes, los trabajos se orientaron a resolver problemas de salud pública causados por el deficiente manejo de los residuos, y a proponer reestructuras y cambios drásticos (Henry et al, 2006; Bundela et al, 2010). En México se hicieron algunos trabajos al respecto, principalmente a partir de la década de 2000 (Buenrostro et al, 2001; Buenrostro y Bocco, 2003), sin embargo, la investigación es escasa en los últimos años.

El objetivo principal de este trabajo consiste en proponer una serie de cambios estratégicos en el conjunto de rutas de recolección de RSU en la Delegación La Magdalena Contreras con la finalidad de mejorar la cobertura del servicio.

Para conocer las condiciones actuales del sistema de recolección en la Delegación La Magdalena Contreras, se recurrió a un diagnóstico cuya función fue la de facilitar la identificación y evaluación de aquellos elementos que merman la capacidad del servicio, haciéndolo ineficiente, insatisfactorio para la sociedad y costoso para las autoridades. El trabajo se dividió en tres etapas: análisis de la demanda, análisis de la oferta y propuesta de alternativas de solución.

La Magdalena Contreras es una de las 16 delegaciones que integran a la Ciudad de México. Ocupa el noveno lugar en extensión y representa el 5 % del territorio de la entidad. De esa superficie, el 82 % (6,153 ha) es área de conservación ecológica y el 18 % restante (1,348 ha) es área urbana, formada por 50 colonias. Estas condiciones tienen una amplia repercusión en el desarrollo de asentamientos humanos y producen también grandes efectos respecto del impacto al medio ambiente.

El número de habitantes de la demarcación creció en aproximadamente 7.9 veces entre los años 1950 y 1980, así pasó de 21,955 a 173,105 habitantes, con lo que prácticamente saturó la extensión destinada a uso urbano. A partir de este periodo, la tasa de crecimiento de la población se ha mantenido entre 0.9 y 1.2 %. Este crecimiento ha detonado

transformaciones de las necesidades sociales, entre ellas, la gestión de los RSU.

2. DIAGNÓSTICO DEL SISTEMA DE RECOLECCIÓN

2.1 Demanda del servicio de recolección domiciliaria

La Ley de Residuos Sólidos de la Ciudad de México establece que un generador que exceda una producción diaria de residuos de 50 kg deja de clasificarse como un generador de RSU.

La Secretaría del Medio Ambiente de la Ciudad de México, en su publicación “Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México 2014” define el porcentaje de generación según la fuente emisora como se muestra en la Tabla 1.

De acuerdo con las cifras proyectadas de población, la Delegación contaría con 242,282 habitantes en 2014 (CONAPO, 2010) mientras la estimación anual de generación de residuos fue de 92,710 toneladas por día (SEDEMA, 2014). La eficiencia de recolección en La Magdalena Contreras es del 75% por tanto, se recolectaron aproximadamente 69,533 en 2014, que en promedio da 190.5 toneladas recolectadas por día. Además, considerando que el 48 % de RSU es de fuente domiciliaria, se determinó un indicador per cápita de 1.06 kg/hab/día.

En la Figura 1 se pueden observar las zonas de mayor generación, así como las que no cuentan con el servicio de recolección.

A partir de la información geográfica, en la Tabla 2 se muestra el nivel de cobertura.

Puede observarse que el 59 % de las colonias se encuentran en condiciones de cobertura incompleta o sin el servicio de recolección.

Tabla 1. Residuos por fuente generadora

| Fuente | Generación |
|--------------------|------------|
| Domiciliaria | 48% |
| Comercios | 15% |
| Servicios | 15% |
| Mercados | 10% |
| Central de Abastos | 5% |
| Diversos | 4% |
| Controlados | 3% |

Fuente: SEDEMA, 2014.

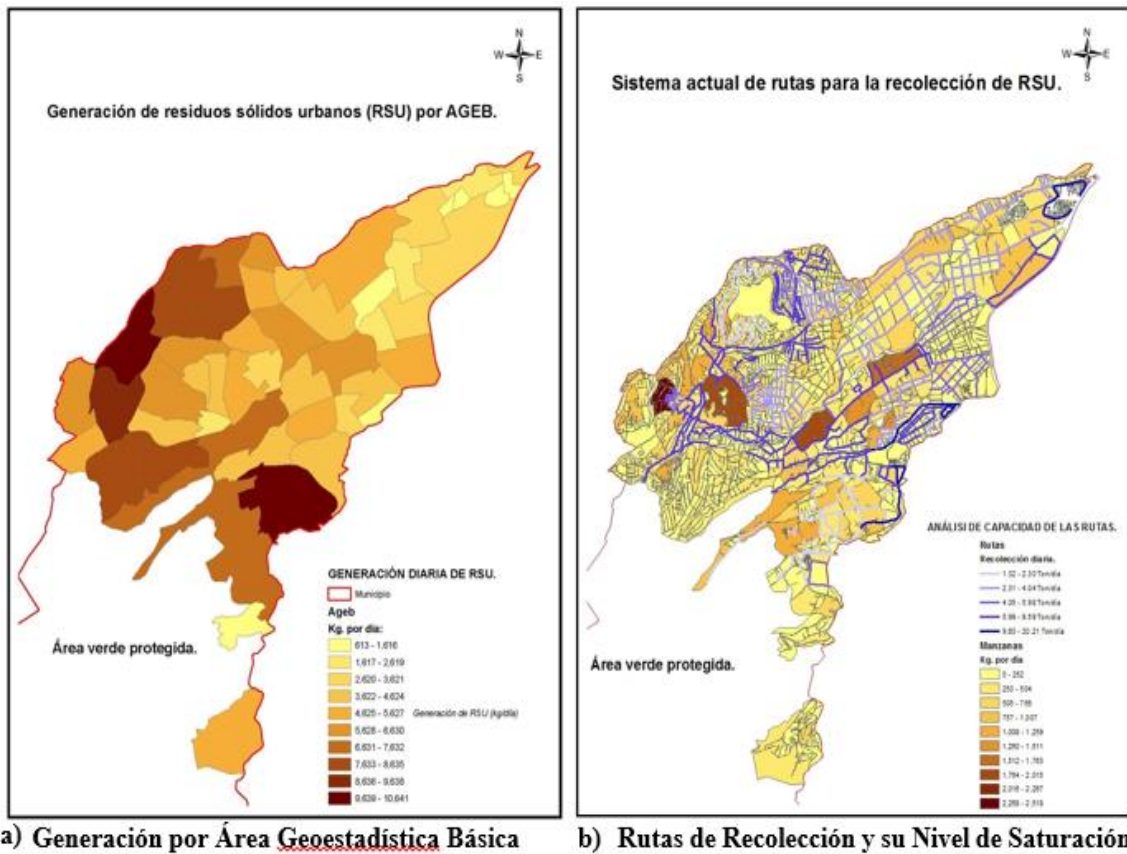


Figura 1. Generación, capacidad y cobertura del servicio de recolección delegacional

Tabla 2. Cobertura del servicio de recolección

| Cobertura del servicio de recolección como porcentaje de la colonia correspondiente | Número de colonias | Porcentaje |
|---|--------------------|-------------|
| Buena cobertura (90 - 100 %) | 21 | 41 % |
| Cobertura incompleta (50 - 80 %) | 17 | 33 % |
| Sin cobertura | 14 | 26 % |
| Total | 52 | 100% |

Fuente: Elaboración propia

2.2 Capacidad del servicio de recolección domiciliaria

Las actividades que constituyen el servicio de recolección de RSU requieren de equipo especializado, personal capacitado y las rutas de recolección. La Delegación La Magdalena Contreras en su Unidad de Limpia, contaba en 2014 con 83 vehículos, para cubrir las 79 rutas registradas.

La recolección de RSU se realiza de lunes a sábado, siguiendo rutas diseñadas con base en la experiencia de los operadores, la observación de las características de la colonia y de las dimensiones de la zona a recorrer. Así, en algunas colonias es necesario que opere más de un vehículo, debido a la extensión; sin embargo, en otros casos solo se utiliza un vehículo con capacidad mínima, que es capaz de recolectar los residuos de la población existente.

Durante la operación no se penaliza a los operarios por no completar sus respectivas rutas. Las supervisiones están dirigidas a la limpieza de la zona, sin importar la hora en que esto ocurra. La inconsistencia en el horario de operación genera un desconcierto en la sociedad.

Para los casos especiales de colonias con baja densidad de población, solo se realizan recorridos tres días por semana como máximo, en esta situación se encuentran principalmente colonias de reciente formación.

Cada una de las rutas posee peculiaridades de acuerdo al tipo de relieve y las condiciones demográficas y socioeconómicas de la región que se trate. En colonias con calles estrechas o con poca población se opta por utilizar vehículos de menores dimensiones. En colonias de gran extensión se requieren más vehículos para poder completar las rutas.

En la Unidad Departamental de Limpia se desconocen algunas características de las rutas, no se sabe cuál de ellas tiene mayor extensión, cuál es la más costosa o cuáles son las más cortas o que exigen menos recursos. El registro consiste del número de la ruta y la colonia asociada a ésta. En todas las rutas se emplea el método de recolección denominado “de esquina” o “parada fija”.

En términos de la cobertura que ofrece el sistema actual, se desconoce la población atendida, así como la cantidad de personas que no cuentan con el servicio, lo que propicia la creación de tiraderos clandestinos.

2.2.1 Capacidad de las rutas

A partir de la información presentada en la Figura 1b se definieron las condiciones en las que se encuentra la cobertura de cada una de las rutas con relación a la capacidad de los vehículos en cada una de ellas.

Con base en estos elementos se pretende determinar cuáles son las rutas saturadas de acuerdo con su capacidad y cuáles se encuentran subutilizadas. La Tabla 3 resume el trabajo de este apartado, en ella pueden consultarse las rutas dentro de una clasificación en tres categorías:

- Suficiente. Si el vehículo asignado a la ruta, recolecta la cantidad diaria de la zona y su capacidad se ocupa en 90 % como máximo.
- Subutilizada. Las rutas en las cuales los vehículos que las operan ocupan menos del 50 % de su capacidad para satisfacer la demanda en su trayecto.
- Insuficiente. Aquellas rutas cuyo vehículo recolector asignado tiene una ocupación mayor al 90 % de su capacidad o bien ésta se ve rebasada por la cantidad de residuos recolectados en la zona correspondiente.

Tabla 3. Saturación de las rutas existentes

| Condición de ruta | Número de rutas | Promedio de ocupación |
|-------------------|-----------------|-----------------------|
| Insuficiente | 25 | 136 % |
| Subutilizada | 22 | 37 % |
| Suficiente | 32 | 55 % |
| Total | 79 | 76 % |

Fuente: Elaboración propia

Con base en esta información, se sugiere una serie de alternativas que permitan hacer más eficiente el servicio de recolección domiciliaria en la delegación, ya que sólo el 39 % de las rutas existentes son capaces de cubrir la generación de residuos que se presenta en sus respectivos territorios y casi el 30 % están subutilizadas.

3. ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

El resultado de los análisis previos deriva en la detección de áreas de oportunidad del sistema de recolección. A continuación, se proponen las estrategias de solución al problema abordado en este texto. Estas propuestas profundizan en tres vertientes:

- Ampliación de la cobertura de las rutas existentes. Partiendo del sistema actual, se ampliarán las rutas con base en la relación oferta/demanda de cada una de ellas.
- Nuevas rutas de recolección. El trazo de nuevas rutas en zonas críticas que carezcan del servicio de recolección, o donde las rutas son insuficientes para satisfacer la demanda.
- Métodos de recolección alternativos. Métodos de recolección que involucren contenedores fijos en puntos estratégicos.

Las estrategias de solución propuestas están sujetas al entorno político y social que la demarcación presenta, de tal manera que están diseñadas con el propósito de afectar lo menos posible el entorno del sistema.

3.1 Ampliación de la cobertura de rutas existentes

Las rutas con posibilidad de ampliación se definen en función de:

- Su capacidad, definida por la capacidad de carga de los vehículos recolectores.
- El índice de generación de residuos por manzana y área geoestadística básica (AGEB).

3.1.1 Procedimiento de ampliación

1. Se analizaron las condiciones generales de la ruta, se determinó el nivel de demanda y la interacción con las rutas aledañas (Figura 2).

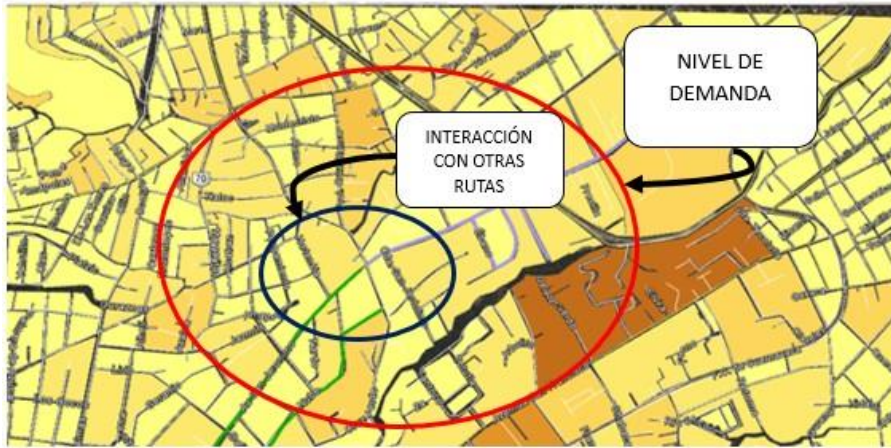


Figura 2. Interacciones en una ruta

2. Se determinó la distancia correspondiente a la ampliación de la ruta bajo los siguientes supuestos:
 - a. La relación entre la distancia de la ruta y la recolección promedio de residuos permanece constante.
 - b. Dada esta relación lineal, a cada incremento en el valor de la variable distancia (km) corresponderá un incremento en el valor de la variable recolección (ton).
3. Se identificaron las vialidades por las cuáles es posible definir la ampliación y se determinó la longitud de las mismas.
4. Se seleccionaron las vialidades que se utilizarán en el nuevo trayecto.

3.2 Nuevas rutas de recolección

La información sobre oferta-demanda registrada en el SIG (Figura 1b) permitió detectar las colonias en las cuáles el servicio de recolección es insuficiente o inexistente. El diseño de nuevas rutas responde a la necesidad de ampliar el servicio hasta estas zonas (Figura 3).

3.2.1 Procedimiento de creación de rutas

1. Ubicación de la zona sin cobertura.
2. Representación de cada zona sin cobertura como una red cuyos nodos están definidos como paradas del vehículo recolector, que consideran tramos de vialidad homogéneos en términos de distancia y características de generación de residuos. El valor del arco es la distancia que recorre el vehículo entre un nodo y otro.
3. Solución del problema. Utilizando el modelo de agente viajero, se planteó cada ruta como un problema de programación entera mixta.



Figura 3. Ubicación de paradas en una zona sin recolección

3.3 Métodos de recolección diferenciados

Como parte del análisis del sistema de recolección de RSU actual, se identificaron dos zonas habitacionales en las cuales es factible la colocación de contenedores, debido a la cantidad de residuos generados.

La mejor ubicación para los contenedores se realizó a partir de considerar las citadas zonas habitacionales como una red. Se empleó el método de localización en redes conocido como *p*-mediana, que permite localizar un número máximo *p* de servicios satisfaciendo la demanda en la red. Así, para resolver los modelos, estos se formularon como problemas de programación entera mixta y se resolvieron usando GAMS 24.4.6.

3.3.1 Procedimiento

Se subdividieron las zonas habitacionales donde resultó factible proponer contenedores para la recolección de residuos, con base en el índice de generación de RSU per cápita, como puede verse en la Figura 4. Cada subdivisión puede representarse como un nodo en una red.

De acuerdo con la generación en cada nodo y la distancia entre cada área, se busca localizar un contenedor en el sitio donde se minimice la distancia recorrida por los habitantes.

La segunda parte de la propuesta consiste en establecer la capacidad de almacenamiento que deben tener los contenedores. Para este cálculo se consideraron 3.5 habitantes promedio por vivienda y un índice de generación per cápita de 1.06 kg/hab/día y un total de 635 viviendas. Con lo anterior se obtiene una generación total de 2,356 kg/día. Para determinar el volumen de los residuos sólidos se considerará un peso volumétrico de $228\text{kg}/\text{m}^3$, de acuerdo al tipo de fuente generadora (Estrada et al., s.f.). Entonces el volumen de los residuos, calculado como $V = \frac{GT}{PV} = (2,356\text{kg}/\text{día}) / (228\text{kg}/\text{m}^3) = 10.3\text{m}^3/\text{día}$ representa el volumen total de residuos de la zona.

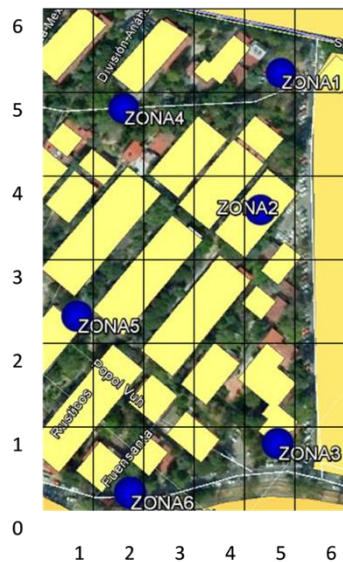


Figura 4. Zonas para ubicación de contenedores

4. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada solución propuesta:

4.1 Ampliación de la cobertura de rutas existentes

De acuerdo con los siguientes elementos, se determinaron las rutas con posibilidad de ampliación:

- Capacidad de las rutas, definida por el tipo de vehículos recolectores (capacidad de carga).
- Índice de generación de residuos a nivel manzana y AGEB.

Con las consideraciones anteriores, 16 rutas pueden ser ampliadas. De acuerdo con el procedimiento de ampliación, se propone una ficha para cada ruta con la siguiente información:

- Longitud de la ampliación (km).
- Colonias beneficiadas.
- Vialidades cubiertas.
- Longitud total de la ruta ampliada (km).
- Horario de Operación.
- Demanda (Ton/día).
- Capacidad (Ton).
- Nivel de saturación actual (%).
- Nivel de saturación con la ampliación (%).

De manera resumida y gráfica, las 16 ampliaciones pueden verse como la Figura 5.

4.2 Nuevas rutas de recolección

La información sobre oferta-demanda registrada en el SIG, permitió detectar las colonias en las cuáles el servicio de recolección es insuficiente o incluso inexistente. El diseño de nuevas rutas responde a la necesidad de ampliar el servicio de recolección. Se delimitaron 12 áreas sin cobertura suficiente. Se diseñó una ruta para cada zona utilizando un modelo de agente de viajero para cada zona.

Utilizando el modelo de agente viajero, se planteó cada ruta como problema de programación entera mixta y se resolvió como tal. La zona mostrada en la Figura 3 fue representada como una red para resolver el modelo y se muestra en la Figura 6.

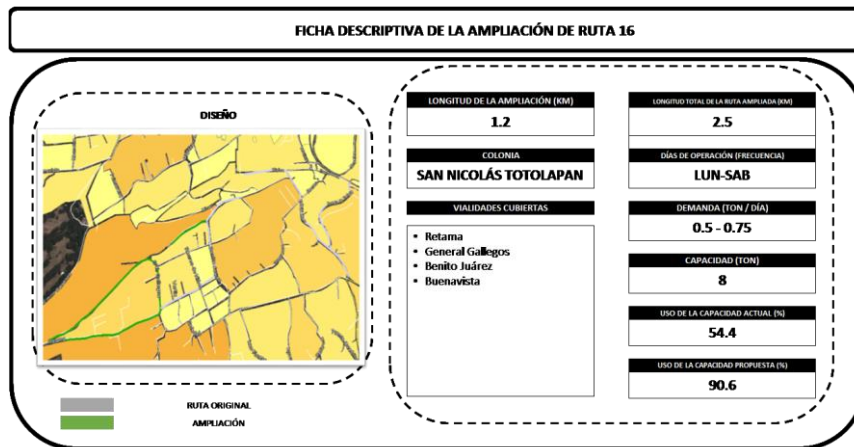


Figura 5. Interacciones en una ruta

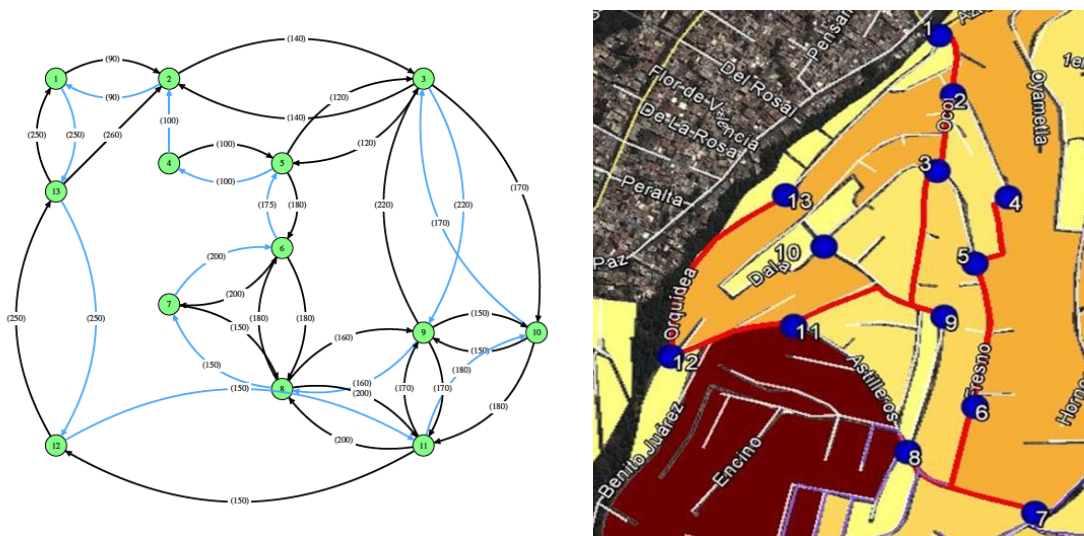


Figura 6. Solución al modelo del agente viajero en la red asociada al problema

4.3 Métodos de recolección diferenciados

Considerando la distribución de las zonas habitacionales, resulta funcional la colocación de 10 contenedores con capacidad mínima de 3m³ cada uno. La ubicación de cada contenedor es el resultado de la solución de un modelo de localización.

De acuerdo con la generación en cada nodo y la distancia entre cada área, se busca localizar un contenedor en el sitio donde se minimice la distancia promedio recorrida por los habitantes. Dicha representación con la solución se muestra en la Figura 7.

De esta manera se determinó la ubicación del contenedor que deberá satisfacer la demanda de recolección de cada zona.

En síntesis, el sistema propuesto de recolección se integra de:

- 16 ampliaciones de ruta
- 11 rutas nuevas
- 10 contenedores de residuos

En los mapas de la Figura 8 se representan tanto el sistema actual de rutas como el sistema propuesto, adicionalmente se ha incluido el análisis de generación de residuos por manzana con la intención de mostrar la interacción entre la oferta y la demanda. Con estas ilustraciones se muestran las diferencias entre la cobertura territorial de ambos sistemas.

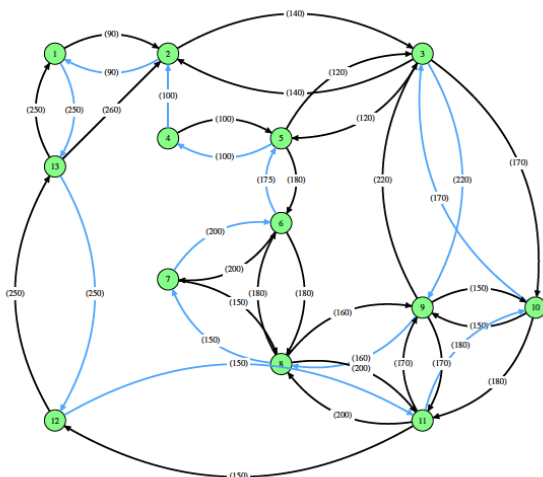


Figura 7. Localización de contenedores

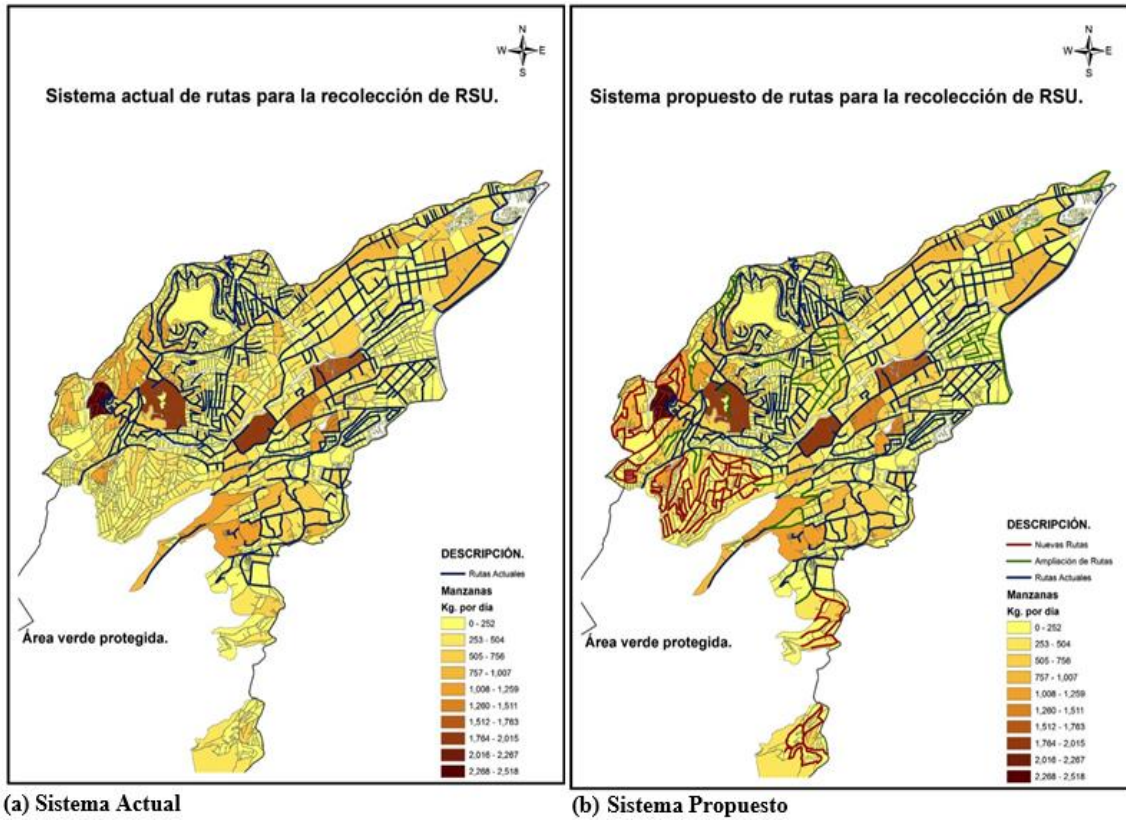


Figura 8. Resumen de resultados

5. CONCLUSIONES

La propuesta de solución para el problema tratado a lo largo de este trabajo inicialmente buscaba el planteamiento de una reestructuración total del sistema de recolección en la zona de estudio. Sin embargo, se encontraron elementos muy importantes e inamovibles para la Unidad Departamental de Limpia Delegacional, por lo que no se permiten cambios radicales, para no ocasionar problemas sindicales que podrían repercutir en el paro del sistema completo.

A pesar de las limitaciones, el presente trabajo aporta una modificación al sistema que lo hace más eficiente, ya que considera las características de la demanda y la oferta. Se determinaron las principales zonas de atención, así como la capacidad necesaria del servicio. De esta manera, el modelo empírico actual puede sustituirse con el objetivo de cubrir a la mayor cantidad de usuarios posibles sin alterar severamente la estructura laboral.

Aunque el tema sobre la recolección de residuos ha sido tratado en una gran cantidad de trabajos, las propuestas difícilmente pueden catalogarse como genéricas. Esto se debe a que la generación de residuos no solamente es un fenómeno que resulta de las necesidades de consumo, se trata de un comportamiento relacionado con las costumbres, cultura e idiosincrasia de una región. Además, en países emergentes, como México, el manejo de los residuos no está bien regulado, por lo que el manejo casi siempre es inadecuado y está

basado en la experiencia de quienes trabajan en el área. Ante comportamientos tan diversos resulta difícil imponer métodos que han funcionado en otras regiones. Las soluciones a veces deben ser adaptadas a la zona de estudio, como en el caso de La Magdalena Contreras.

La presente investigación deja ver la importancia de adoptar herramientas técnicas para el diseño del servicio de recolección. En los resultados se hizo evidente la mejora de la cobertura. No obstante, también se reveló la importancia de contar con programas integrales capaces de no alterar las condiciones del sistema.

Asimismo, es necesario considerar que la recolección de residuos es un fenómeno evolutivo, incrementa su magnitud y características según el crecimiento de la población y las costumbres de las entidades, bajo este contexto, las técnicas para el manejo deben actualizarse según las necesidades de la población y las capacidades técnicas y tecnológicas.

REFERENCIAS

- BUENROSTRO, O., Y BOCCO, G. (2003). *Solid waste management in municipalities in México: goals and perspectives*. Resources, conservation and recycling, 39(3), 251–263.
- BUENROSTRO, O., BOCCO, G., Y BERNACHE, G. (2001). *Urban solid waste generation and disposal in Mexico: a case study*. Waste Management & Research, 19(2), 169–176.
- BUNDELA, P., GAUTAM, S., PANDEY, A., AWASTHI, M., Y SARSAIYA, S. (2010). *Municipal solid waste management in indian cities—a review*. International journal of environmental sciences, 1(4), 591–606.
- CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN, CONAPO. (2010). *Proyecciones de la población 2010-2050*.
- ESTRADA, R., CARMONA, R., Y TREGONING, H. (s.f.). *Criterios técnicos para el diseño de sistemas de almacenamiento de residuos sólidos por tipo de fuente generadora*.
- GAMS 24.4.6. (2015). <http://www.gams.com>.
- HENRY, R. K., YONGSHENG, Z., Y JUN, D. (2006). *Municipal solid waste management challenges in developing countries—kenyan case study*. Waste management, 26(1), 92–100.
- MORRISSEY, A. J., Y BROWNE, J. (2004). *Waste management models and their application to sustainable waste management*. Waste management, 24(3), 297–308.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE, SEDEMA (2014). *Inventario de residuos sólidos de la Ciudad de México 2014*.
- SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL, SEDESOL (2004). *Manual técnico sobre generación, recolección y transferencia de residuos sólidos municipales*.



24 Diseño de rutas de recolección de residuos sólidos en Ciudad Universitaria

Carlos Adrián Enríquez Santillán

Angélica Lozano

Universidad Nacional Autónoma de México, México

RESUMEN

En este artículo se describe el diseño de una propuesta de solución al problema de recolección de residuos sólidos en el campus de Ciudad Universitaria (CU) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) al sur de la Ciudad de México. Los recorridos de recolección actuales fueron determinados mediante la asignación de paradas ubicadas en función de las zonas en las que se divide CU y de la cantidad de contenedores en cada parada, por lo que el sistema no es eficiente y las rutas no están equilibradas. Con base en información recabada durante el trabajo de campo se modeló el sistema como un Problema de Rutas de Vehículos, y se obtuvieron soluciones que mejoran las rutas, principalmente se equilibran las rutas en términos de tiempo y distancia de recorrido.

Palabras clave: Recolección de residuos, problema de rutas de vehículos, ventanas de tiempo.

1. INTRODUCCIÓN

El uso y aplicación de modelos matemáticos a problemas de ruteo ha cobrado gran relevancia en los últimos años porque ayudan a disminuir los costos, la distancia, el tiempo de recorrido y a mejorar la calidad del servicio. La recolección de residuos sólidos en zonas urbanas es un caso particular de estos problemas, donde los objetivos principales son reducir el número de vehículos requeridos, minimizar la distancia o el tiempo de recorrido y brindar un buen nivel servicio al cliente, maximizando las ganancias.

Las primeras herramientas para el diseño óptimo de rutas surgieron en los años 70 basados en ideas intuitivas, sin una formulación del modelo, sin función objetivo y en algunos casos sin exploración del espacio de soluciones. Posteriormente, en los años 80, se formularon algunas funciones objetivo y se incorporaron nuevos parámetros como la satisfacción de la demanda y el factor de carga (Axhausen y Smith, 1984).

Muchos problemas de toma de decisiones existentes en el mundo real, en particular aquellos relacionados con producción, ruteo de vehículos, logística, planificación, etc. se pueden formular como problemas de optimización. El problema de este estudio puede ser formulado como un problema de optimización combinatoria. En estos problemas, las soluciones son

consideradas variables discretas y el proceso de búsqueda de soluciones consiste en explorar el espacio de soluciones del problema.

Entre los problemas de optimización combinatoria, se encuentran los de rutas de vehículos. El Problema de Rutas de Vehículos (“Vehicle Routing Problem” o VRP, por sus siglas en inglés) consiste en minimizar el costo total del recorrido de manera que se atienda la demanda sin exceder la capacidad de carga de los vehículos utilizados, los cuales inician y finalizan sus recorridos en uno o más depósitos, con restricciones específicas que dependen del problema que se aborda.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Este estudio se realizó para el campus CU de la UNAM, que es considerado Patrimonio de la Humanidad, por lo que debe contar con un buen manejo de residuos sólidos. Aunque para CU ya se han desarrollado programas para el manejo y separación de residuos sólidos, de reciclaje, propuestas para el cambio de contenedores de residuos, etc., ningún estudio se enfocó en la recolección, manejo y disposición final de los residuos (Hernández, 2007, Lizarde, 2009).

CU se localiza al sur de la Ciudad de México y cuenta con una superficie construida de 1'030,399 m². La Dirección General de Obras y Conservación (DGOyC¹) de la UNAM calculó que en CU se generan 15 toneladas de residuos por día, con una población que es superior a las 150,000 personas. Así, la generación promedio es de 0.098 kg por universitario² por día, considerando la población que realiza sus actividades dentro de CU (ECOPUMA, 2011).

CU se encuentra dividida en dos zonas: el Centro Cultural Universitario (CCU) y la Zona Norte (ZN). En cada zona existe un depósito donde los camiones recolectores inician y finalizan su recorrido. Este estudio se enfocó únicamente en la ZN.

Actualmente cinco camiones están encargados de realizar la recolección de residuos sólidos en los 96 puntos ubicados dentro de la ZN de CU, para esta labor la DGOyC tiene definidas ocho rutas de recolección que son: Ruta Deportiva, Ruta Campus Central, Ruta Circuito Exterior, Ruta de los Institutos, Ruta Tarde, Ruta Campus Central Tarde, Ruta Orgánica Mañana, Ruta Orgánica Tarde.

Los vehículos utilizados para llevar a cabo la recolección tienen una capacidad de cinco toneladas a excepción del camión que se encarga de recoger los residuos orgánicos cuya capacidad es de tres y media toneladas.

1 Dependencia encargada de coordinar la recolección de residuos dentro de la UNAM

2 Comprende estudiantes, académicos y administrativos.

Tabla 1. Tiempo y distancia de los recorridos actuales para cada ruta

| Ruta | Tiempo de recorrido actual [horas] | Distancia recorrida actual [km] |
|----------------------|---|--|
| Campus central | 2:33 | 14.0 |
| Tarde | 1:46 | 15.9 |
| Circuito exterior | 2:28 | 16.8 |
| Orgánica tarde | 2:48 | 28.6 |
| Campus central tarde | 4:46 | 36.0 |
| Orgánica mañana | 4:00 | 45.5 |
| De los Institutos | 4:09 | 47.4 |
| Deportiva | 4:58 | 70.3 |

En la Tabla 1 se muestran los puntos de recolección de dicha zona, la distancia y el tiempo de recorrido de cada ruta. Los camiones deben ir a depositar los residuos recolectados al Centro de Transferencia del gobierno de la ciudad ubicado fuera de CU, los vehículos de las rutas matutinas lo hacen en la tarde y los que cubren las rutas de la tarde van al día siguiente.

Los problemas planteados por el personal encargado de la recolección en cada punto, son los mismos para todos: la composición de los residuos (universitarios más domiciliarios), la mala o nula separación, fallas en el equipamiento, ya sea por un número insuficiente de contenedores para los residuos orgánicos o por la antigüedad de los camiones recolectores (más de 15 años), y la incontrolable actividad de los pepenadores que sustraen de los contenedores el plástico, vidrio, cartón y aluminio y dejan el resto de los residuos en el piso. Esto incide tanto directa como indirectamente en el tiempo de recolección. Durante el trabajo de campo se detectó que la verdadera oportunidad de mejora radicaba en la organización de la recolección, la disposición de contenedores para residuos orgánicos y el establecimiento de lugares exclusivos para cargar los camiones.

A partir del conocimiento de los problemas descritos anteriormente, el presente trabajo se enfocó únicamente en reducir el tiempo o la distancia de recorrido actual de todas las rutas. Cabe señalar que el personal de recolección considera que su trabajo se puede realizar en menor tiempo con una mejor organización.

Actualmente la programación de los recorridos se hace de forma empírica, lo que contribuye al congestionamiento del tránsito en los circuitos viales de CU y al desequilibrio de tiempo y distancia de los recorridos entre las rutas. Todo esto impide que la recolección de residuos se realice de manera eficiente en CU.

En este trabajo se modeló el sistema actual como un problema de Rutas de Vehículos y se buscó una solución que permitiera mejorarlo. Los resultados fueron buenos, al comparar la situación actual con el resultado final obtenido. También se generó información hasta hoy inexistente y mapas con la localización de cada nodo y ruta de recolección.

3. METODOLOGÍA

El objetivo de este estudio es mejorar las rutas de recolección de residuos sólidos, mediante la solución de un conjunto de escenarios con rutas balanceadas (donde tiempos y distancias de recorrido sean similares en todas las rutas).

Primero se solicitó información a la DGOyC sobre estudios previos relacionados con la recolección de residuos sólidos y la ruta que seguían. Una vez revisados, fueron ubicadas las zonas donde se realiza la recolección, que es: dentro de las Facultades, en los estacionamientos y en las dependencias administrativas que se encuentran dentro de CU.

Ya que no se contaba con información suficiente sobre cómo opera el sistema actual de recolección, se diseñó el trabajo de campo que consistió en realizar cada uno de los recorridos en los vehículos correspondientes con la finalidad de identificar cuáles y cuántos puntos se atienden, observar las condiciones en las que se realiza la recolección, la cantidad acumulada de residuos por punto y el camino que siguen para llegar a ellos. Esto permitió conocer las fortalezas y debilidades del sistema, algunas de ellas bien identificadas por el personal de recolección. La información geográfica requerida para el modelo se recabó durante el trabajo de campo: la red vial de CU y la ubicación de los contenedores (Figura 1).

Con esta información se identificó el modelo de Rutas de Vehículos que mejor representaba al problema, se cargó la información en el modelo y se propusieron diversos escenarios a partir de las condiciones posibles que mejorarían la recolección, se establecieron criterios de selección para obtener las mejores rutas de cada uno de los escenarios propuestos, cada escenario se comparó con la situación actual y se seleccionaron las mejores soluciones.

La base de datos de la red vial de CU contiene un total de 902 registros (puntos) y está formada por campos como: ID que se le asigna a cada registro para su identificación, la longitud de los arcos en kilómetros, el tiempo de inicio y el tiempo final que es el lapso en el que el punto es atendido, denominado también ventana de tiempo. Además, se considera el tiempo de servicio, que es el tiempo que transcurre entre la llegada y la salida del camión del punto, y el tiempo por unidad que es el período que se emplea en recoger una unidad de residuos.

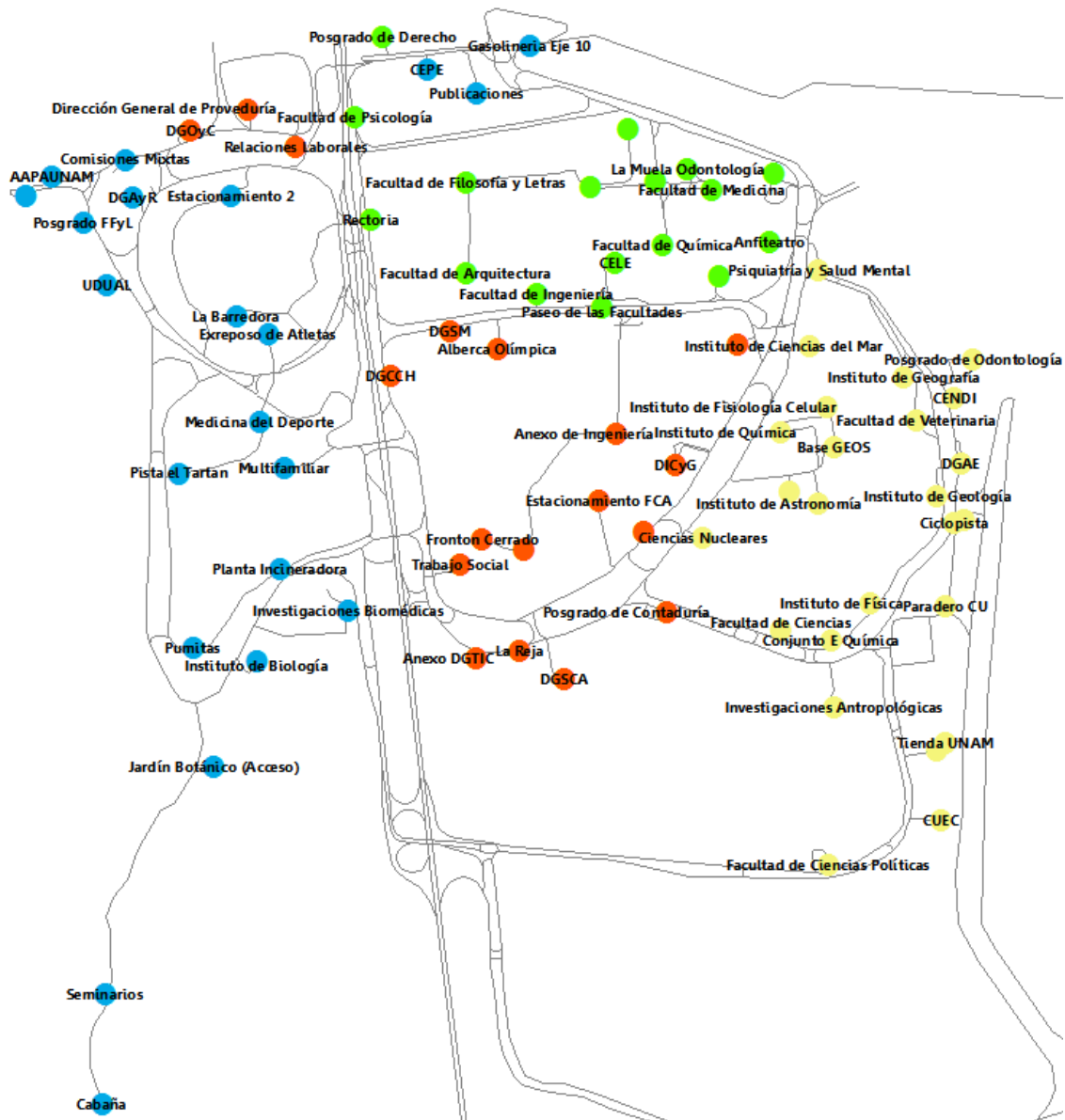


Figura 1. Red vial y ubicación de los puntos de recolección en CU

En la capa de puntos de recolección se agregó la ventana de tiempo para cada uno. Algunas ventanas son muy estrictas ya que hay puntos que deben ser visitados antes que otros, sin importar la distancia entre ellos. En el caso de los puntos que se encuentran dentro de estacionamientos, el camión debe ingresar a muy temprana hora, de lo contrario obstaculizaría la circulación de los otros vehículos y sus maniobras serían difíciles o imposibles.

El Centro de Transferencia, equivalente a un Centro de Distribución en el modelo empleado, se encuentra ubicado al suroeste y a más de 10 kilómetros de CU.

Con base en la información anterior, el problema se planteó como uno de Rutas de Vehículos de Distribución y Recolección con Ventanas de Tiempo (Cordeau et al., 2007). Se consideraron las condiciones (restricciones) que tienen actualmente los recorridos. Por

ejemplo, se consideró que las rutas de la tarde “distribuyen” primero la carga del día anterior hacía el Centro de Transferencia y posteriormente realizan la recolección en los puntos que tienen asignados para cumplir con su itinerario.

Cada punto tiene su propia ventana de tiempo rígida y la demanda en cada uno de ellos es desconocida (la acumulación de residuos puede superar la capacidad de los contenedores).

Una vez que los camiones terminan la recolección, regresan al Centro de Transferencia a “distribuir” los residuos para finalmente regresar al depósito de donde salieron inicialmente (los Talleres de Conservación).

4. RESULTADOS

La solución y análisis de los escenarios planteados permitieron obtener buenas rutas para cada camión.

En la solución inicial se tomaron los puntos que pertenecen a cada recorrido y se establecieron ventanas de tiempo de manera estricta a un cierto número de puntos, se reorganizó la forma de recolección para cada ruta y se separaron por turnos de recolección (mañana y tarde). También se incluyó la restricción adicional en dos rutas de la mañana, para que se dirijan al Centro de Transferencia a dejar lo recolectado la tarde del día anterior para después iniciar su recorrido de recolección.

Los resultados obtenidos para los recorridos de la mañana se muestran en la Tabla 2. En estos nuevos itinerarios únicamente cambia el orden actual en el que se visitan los puntos, respetando las ventanas de tiempo establecidas para cada punto, lo que permite mejorar la recolección. En esta solución se incrementó en casi tres kilómetros, la distancia de recorrido de la Ruta de los Institutos.

En las rutas de la tarde se obtuvieron menores distancias de recorrido principalmente en la Ruta del Campus Central, la cual disminuyó tres kilómetros. Para la ruta denominada Tarde y la ruta Orgánica también se obtuvieron mejores tiempos totales de recorrido, de dos kilómetros y medio y casi dos kilómetros respectivamente, como se muestra en la Tabla 3.

La segunda solución se enfocó principalmente a buscar un balance de tiempo en las rutas, en especial en la Ruta Deportiva que era muy larga; para lograr esto se modelaron tres diferentes escenarios.

En los primeros dos escenarios se cambiaron los horarios de apertura de varios de los puntos que se atienden al inicio del recorrido, estableciéndolo a las 6:00 h en lugar de las 8:30 h (ya que es posible recomendar el cambio de horario de acceso a esos puntos).

En el tercer escenario se quitó el punto de recolección más lejano que atiende esta ruta, el cual se agregó al recorrido de la ruta del Circuito Exterior obteniendo así otra solución al problema. En la Tabla 4 se presentan los resultados para los tres escenarios y se destaca la reducción de tiempo, y principalmente de distancia de recorrido del tercer escenario.

Tabla 2. Comparación entre la situación actual y la solución inicial de los recorridos matutinos

| Rutas matutinas | Situación actual | | Solución inicial | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) |
| Deportiva | 4:58 | 70.30 | 3:45 | 57.60 |
| Campus Central | 4:46 | 36.00 | 4:41 | 30.30 |
| Circuito Exterior | 2:28 | 16.80 | 2:03 | 14.18 |
| De los Institutos | 4:09 | 47.40 | 3:55 | 50.10 |
| Orgánica | 4:00 | 45.50 | 3:43 | 35.30 |
| TOTAL | 20:21 | 216.00 | 18:07 | 187.48 |

Tabla 3. Comparación entre la situación actual y la solución inicial de los recorridos de la tarde

| Rutas vespertinas | Situación actual | | Solución inicial | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) |
| Tarde | 1:46 | 15.90 | 1:15 | 13.40 |
| Campus Central | 2:33 | 14.00 | 2:20 | 10.94 |
| Orgánica | 2:48 | 28.60 | 2:20 | 26.70 |
| TOTAL | 7:07 | 58.50 | 5:55 | 51.04 |

Tabla 4. Escenarios de la Ruta Deportiva

| Ruta Deportiva | Tiempo Total (horas) | Distancia Total (km) |
|------------------|----------------------|----------------------|
| Escenario 1 | 3:47 | 58.3 |
| Escenario 2 | 3:45 | 57.6 |
| Escenario 3 | 3:12 | 36.2 |
| Situación Actual | 4:58 | 70.3 |

Tabla 5. Comparación entre la situación actual y el Escenario 1 de la Ruta del Circuito Exterior

| Ruta | Situación actual | | Escenario 1 | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Tiempo total (horas) | Distancia Total (km) | Tiempo total (Horas) | Distancia total (km) |
| Circuito Exterior | 2:28 | 16.8 | 3:54 | 56.2 |

Tabla 6. Comparación entre la situación actual y la solución final para los recorridos matutinos

| Rutas matutinas | Situación actual | | Solución balanceada | |
|---------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) |
| Deportiva (Escenario 3) | 4:58 | 70.30 | 3:12 | 36.20 |
| Campus Central | 4:46 | 36.00 | 3:33 | 30.80 |
| Circuito Exterior (Escenario 1) | 2:28 | 16.80 | 3:54 | 56.20 |
| De los Institutos | 4:09 | 47.40 | 3:55 | 50.10 |
| Orgánica | 4:00 | 45.50 | 4:21 | 35.30 |
| TOTAL | 20:21 | 216.00 | 18:07 | 187.48 |

Tabla 7. Comparación entre la situación actual y la solución final para los recorridos vespertinos

| Rutas vespertinas | Situación actual | | Solución balanceada | |
|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) | Tiempo total (horas) | Distancia total (km) |
| Tarde | 1.77 | 15.9 | 1.25 | 13.40 |
| Campus Central | 2.55 | 14.0 | 2.33 | 10.94 |
| Ruta Orgánica | 2.80 | 28.6 | 2.33 | 26.70 |

En la tercera solución del problema se buscó el balance en tiempo y distancia de todos los recorridos. Tomando en cuenta las dos soluciones anteriores, la tercera consistió en agregar el punto sustraído de la Ruta Deportiva a la ruta del Circuito Exterior. Una vez que se agregó el punto y se modeló el recorrido se obtuvo el Escenario 1 de la Ruta del Circuito Exterior (Tabla 5).

En comparación con la situación actual, en dicho escenario, la distancia y el tiempo total de recorrido aumentaron significativamente, sin embargo, aunque éste era uno de los recorridos de menor duración, con la agregación del punto más lejano modificación se logró el balance buscado. La agrupación de las soluciones balanceadas se muestra en la Tabla 6 para los recorridos matutinos y en la Tabla 7 para los vespertinos.

5. CONCLUSIONES

El presente trabajo puede servir de base para implementar un sistema de recolección de residuos en CU, que tome en cuenta restricciones que se presentan en la realidad y que permita mejorar la recolección.

Se obtuvo una forma de mejorar el sistema de recolección de residuos en CU. La distancia

total de cada recorrido se redujo un 10 por ciento para cada ruta, excepto para la ruta que recoge los desechos orgánicos en el turno vespertino, que sólo se redujo en un 5 por ciento. También se generó información de interés para los encargados de los Talleres de Conservación, ya que les permitirá conocer los recorridos que realizan las ocho rutas, el tiempo que les toma hacer la recolección y la distancia total que recorren los camiones actualmente.

Comparada con la situación actual, la solución obtenida en este estudio fue mejor porque, además de representar mejor la realidad, se obtuvo un balance para las ocho rutas en tiempo y distancia total de recorrido.

El objetivo de crear escenarios para la Ruta Deportiva y la del Circuito Exterior fue para buscar un balance en los tiempos y las distancias de los recorridos ya que actualmente tienen cargas de trabajo muy diferentes. Al comparar la situación actual con los resultados de los mejores escenarios se observa que, el sistema de recolección se puede mejorar si se toma en cuenta la solución inicial para las Rutas de los Institutos, Tarde, Campus Central y Orgánica (estas dos últimas en ambos turnos), el escenario tres para la Ruta Deportiva y el uno para la del Circuito Exterior, con lo que el balance en tiempo y distancia de recorrido se logró para todas las rutas.

REFERENCIAS

- AXHAUSEN, K. W. Y SMITH, R. L. (1984). *Evaluation of Heuristic Transit Network Optimization Algorithms*. Transportation Research Record, Vol. 976, 7-20.
- CORDEAU, J., LAPORTE, G., SAVELSBERG, M. Y VIGO, D. (2007). *Vehicle Routing*. En Barnhart C. y Laporte G. eds. Transportation, Handbooks in Operations Research and Management Science. Vol. 14. Elsevier, Ámsterdam, pp. 367–428.
- ECOPUMA (2011). *Estrategia de Universidad Sustentable*. Informe Anual 2008-2013. Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad, UNAM.
- HERNÁNDEZ, C. (2007). *Manejo de residuos sólidos en Ciudad Universitaria*. Tesis de licenciatura (Biología). Facultad de Ciencias, UNAM.
- LIZARDE, I. (2009). *Estudio de viabilidad de implementación de un Plan Integral de Manejo de Residuos Sólidos Urbanos en Ciudad Universitaria*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM

SECCIÓN 5

LOGÍSTICA Y TRANSPORTE DE CARGA

LOGISTICS AND FREIGHT TRANSPORTATION

25 Governance in intelligent logistics platforms through information and communication technology

Leonardo Varella

Mirian Buss Gonçalves

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

Regina Meyer Branski

Universidade De São Paulo, Brasil

Orlando Fontes Lima Junior

Universidade Estadual de Campinas, Brasil

ABSTRACT

There are different actors and objectives involved in the logistics within a logistics platform. Tenants, stakeholders and 3PLs have distinct necessities and views, where the governance is an important aspect for the operations of logistics platforms. Information and Communication Technology (ICT) is an important core competence in the operations of logistics platforms. So, how can ICT infrastructure aid in the governance aspects of logistics platforms? The objective of this paper is to analyze the importance of ICT systems in the management and operations of logistics platforms using a case study of three logistics platforms in the State of Santa Catarina, through interviews and analysis of data. The use of an “Intelligent Platform Attributes” model for each facility highlighted the importance of an ICT systems and other attributes as indicators of governance, resulting in a proposal of a framework of attributes for governance in logistics platforms.

KEYWORDS: Logistics Platforms, Governance, ICT, Strategic Planning.

1. INTRODUCTION

Governance is a complex and defying concept. While political structures are commonly related to territorial spaces, aspects such as legitimacy and mediation are relationally constructed among the interested parts and through power relationships and political relationships. Then governance becomes a strategic asset in the communication, cooperation and coordination among government organizations, non-government organizations and individuals, and incorporates multiple scales of the government and its internal relations (Marks, 1993; MacLeod, 1997; Hooghe & Marks, 2001; Allen & Cochrane, 2007; Monios & Wilmsmeier, 2012 cited by Monios, 2015).

The objective of this study is to analyze the importance of ICT systems in the management and operations of logistics platforms using a case study of three logistics platforms in the State of Santa Catarina, through interviews and analysis of data. Using an Intelligent Platforms Attributes Model, we interviewed the managers of three logistics facilities (inland freight nodes). The findings highlighted the importance of an ICT systems and other attributes as indicators of governance, resulting in a proposal of a framework of attributes for governance in logistics platforms.

2. LOGISTICS PLATFORMS

Despite numerous studies on logistics platforms, there is no consensus among authors on what actually characterizes these facilities. Boile et al. (2009) were of the few that studied platforms in Europe, Asia and North America in a systematic way – one of their main findings was that the government support and the establishment of public-private partnerships are essential for the competitive advantages promotion and for attracting enterprises to these projects. The European Association of Freight Villages (EUROPLATFORMS) defines logistics platforms as “a defined area within which all activities relating to transport, logistics and distribution of goods, both for national and international transit, are carried out by various operators [...] it is run by a single body, either public or private, and is equipped with all the public facilities to carry out the above mentioned operations” (Europlatforms, 2004 cited by Almotairi, 2012).

Over the years, authors had outlined some of the fundamental elements of a logistics platform business model: location with an easy access to other transportation infrastructures; intermodal capability, and engagement of the public sector as an investor and strategic partner, ensuring economic sustainability and regional development (Weisbrod et al., 2002; Abrahamsson et al., 2003; Bastos et al., 2010; Almotairi, 2012; Varella et al., 2012). Those are definitely not the only success factors that platforms shall overcome to thrive (Varella and Gonçalves, 2013; Silva et al., 2014). It is also important to explore their potential to reduce costs and increase the competitiveness of its partners, attributes that guarantee the business intelligence of these facilities, being able to streamline processes and reduce the chain complexity (Branski and Lima Jr., 2013).

3. THEORETICAL MODEL FOR INTELLIGENT LOGISTICS PLATFORMS

Insufficient theories, able to guide studies on this topic, result from a limited view of the platforms. Models are theoretical structures that provide the basis for the development of theories. Based on the observation of a concrete phenomenon, models contribute to identify characteristics, similarities and differences among the elements, testing explanatory hypotheses, generalizing or particularizing conclusions and discovering new aspects still not observed (Sayão, 2001). A model can contribute to identify the critical success factors of the business model of a logistics platform and understand the dynamics of these success factors

- how an optimal performance of such elements can bring efficiency in the related supply chain.

A model proposed by several studies (Branski et al., 2011; Varella et al., 2012; Carvalho et al., 2013; Branski and Lima Jr, 2013) classified the elements into three groups: environmental attributes, platform attributes and intelligence attributes, and the model was built in three stages. Initially, Branski et al. (2011), from a survey of 10 European platforms sites with good performance (Verona, Bologna, Torino, Nola, Parma, Bremen, Nuremberg, Berlin, Madrid and Barcelona), identified their main elements. Then, these elements were gathered into two groups: environmental attributes and platform attributes. The environmental attributes refer to the location and transportation infrastructure in the region. In turn, Carvalho et al. (2013) applied this model to three successful facilities: Plaza (Spain), District of Nola (Italy) and the Industrial Park in Kalundborg (Denmark). The study confirmed some of the previous findings: the success of these facilities depends on the geographic location; and the intermodal services and a centralized management evidence a relatively unexplored aspect. Platforms must be seen not only as logistics facilities but as business, i.e., generators able to promote the logistics process rationalization by the integration and synergy of agents, supported by rules for occupation and use of spaces that guarantee the facility's vocation (Carvalho et al., 2013).

Branski and Lima Jr. (2013) proposed a new model for the study of logistics platforms where the attributes (environment and facilities) were complemented by the attributes/indicators that confer intelligence to these facilities (integration, synergy and governance), as seen in Table 1. The new structure provided a platforms holistic view, not restricted to the operation and functionalities, but considering the elements able to streamline processes and reduce the complexity of the supply chains.

The integration is related to data and information exchange in real time, which requires the use of Information and Communication Technology (ICT). Synergy results from the establishment of cooperative actions among different companies, allowing a better use of the resources and creating a win-win situation. Then, beyond the critical aspects such as clear guidelines, the mechanisms for encouraging the integration and synergy must coexist with policies for sharing benefits and responsibilities, defined as Governance mechanisms.

The objective of this research is to identify and analyze how the ICT systems aid to improve the governance policies between owners and tenants in the logistics platforms operations, through a multiple case study and the validation of the findings with the current literature.

Table 1. Attributes of Intelligent Logistics Platforms

| Attributes for Intelligence | | |
|-----------------------------|---|--|
| Integration | Exchange of data between companies through networks and the synchronization of physical flows | |
| Synergy | Sharing the infrastructure, equipment and services of the platform | |
| | Vertical | ICT-oriented arrangements, strategic and operational arrangements |
| | Horizontal | <ul style="list-style-type: none"> – Establishment of groups – Sharing warehouses, freight, assets and resources – Operating activities – Contractors and support – Knowledge – Co-brand |
| Governance | Rules for occupation and use of the space Identification and promotion of synergistic actions Sharing benefits and responsibilities | |

Source: Branski and Lima Jr, 2013

4. METHODOLOGY

This study is a field research with exploratory and descriptive characteristic, developed through a multiple case study using the method of content analysis, through interviews in three facilities defined as logistics platforms, located along the coast of Santa Catarina, in a ring of influence that contains the Santa Catarina, Rio Grande do Sul, Paraná, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul and São Paulo states.

The construction of the questionnaire containing the research agenda was conceived through previous works (Varella et al., 2012; Varella and Gonçalves, 2013; Varella et al., 2015), and primary research to identify the most relevant core competences for the design of strategic planning for a logistics platform. This study is about the involvement of the ICT infrastructure in the governance policies of regional logistics platforms, identifying the benefits that a modern approach of ICT can imply on the relationships, the attractiveness for their potential clients and their logistics processes and supply chains. We had conducted a semi-structured interview questionnaire to the managers of three important regional logistics platform companies from the ports of Itajaí and São Francisco do Sul. We focused on questions regarding their concern about the importance of a high-level ICT infrastructure for their businesses and for guarantee mutual trust and benefits, when a large part of their business operations is delegated to a logistics provider. We also asked how governance principles may affect their logistics performance and how ICT is shaping the strategic planning of these environments.

An inductive methodology was used to identify the importance of the ICT in governance aspects for logistics platforms, based on an analysis of case study. It is impossible to simply compare the results of the analyzed companies and relate their views to the cases in the literature. Nevertheless, it is possible to develop a framework of governance attributes by identifying a typology, to understand the importance of each attribute. We suggest that these attributes can improve the operations performance for logistics platforms similar to those analyzed.

5. RESULTS

In this section, we present the following: a brief characterization of the analyzed facilities; the ICT infrastructure aspects pointed out by the managers interviewed; and the Branski and Lima (2013) model applied to identify the attributes of Intelligent Logistics Platforms. It is focused on the integration and governance aspects as outlined by Varella and Gonçalves (2013). Finally, according to the current literature, the findings were validated and some prospects are posed for future research.

5.1 Logistics Platform 1 (LP 1)

This facility is located in the hinterland area of the Port of Itajaí, Santa Catarina State. It was established in 1984 and expanded in 1996, and currently it is one of the major players in the automotive, pharmaceutical and chemical logistics, serving the south region of Brazil. The characterization of this facility is presented in Table 2.

The manager highlighted the importance of the ICT for their operations, pointing out that one of the most important value-added element of attraction of a logistics hub is its service integration with clients. A couple of years ago, there was an investment to ditch the old Enterprise Resource Planning (ERP) platform and switch to another solution. The manager cites “a pressure from its clients” to adopt a different platform. Other modules were also replaced/upgraded, such as the Warehouse Management System and the Transportation Management modules. The clients are increasingly supporting sustainable environment policies in the supply chain, which made the company adapt sanitary, water-disposal and energy efficiency aspects. The compliance with international standards is also a desirable value-added competence; the manager cited that “the adoption of ISO 9001:2008 has brought gains in terms of negotiation and contractual obligations with the clients – and the results of the adoption of ISO 14000 are promising”.

Based on the information from the interview and the documentation provided by the organization, we applied the Theoretical Model for Intelligent Logistics Platforms; the results are presented in Table 3.

5.2 Logistics Platform 2 (LP 2)

This facility is also located next to the Itajaí port. It is the only dry-port of refrigerated cargo

with a permit of customs clearance from the authorities, which provides a crucial service to all livestock companies that have businesses in the southern region of Brazil (Santa Catarina, Rio Grande do Sul and Paraná), and have importation/exportation contracts with over 200 countries. The characterization of this logistics platform is presented in Table 4.

Table 2. Characterization of the LP 1

| | |
|---------------------------------|--|
| Location | Itajaí |
| Size | Medium (about 100,000 m ²) |
| Management | Private |
| Transportation Modals | Multimodal. Maritime (main); road (secondary); air (tertiary) |
| Intermodality | Yes |
| Main Companies and Goods | Pharmaceutical, chemical and hospital equipments, vehicles (import/export), high-value goods (jewelry, watches, perfumes, electronics) |

Table 3. Attributes for Intelligence in LP 1

| Attributes for Intelligence in LP 1 | | | |
|--|---|-------------------|--|
| Integration | EDI, WMS, TMS, BI, RFID, SCP and ERP are used to keep the processes integrated | | |
| Synergy | Shared usage of equipment (trucks, pallets, handlers) and services (cleaning and disinfection; vehicle parking lot; energy) | | |
| | Cooperation | Vertical | Final Manufacturing ISO compliance |
| | | Horizontal | – Sharing of warehouses and transportation services – Operating activities – Cargo Consolidation/Deconsolidation |
| Governance | Electronic ATI for customs clearance; Designated specific areas for security and cargo handling ISO compliance | | |

Table 4. Characterization of the LP 2

| | |
|---------------------------------|---|
| Location | Itajaí |
| Size | Medium (about 75,000 m ²) |
| Management | Private |
| Transportation Modals | Multimodal. Maritime (main); road (secondary) |
| Intermodality | Yes |
| Main Companies and Goods | Transport of reefer cargo (beef, chicken, pork, lamb, fish) |

The manager affirmed that the company is very concerned about governance principles, citing “we must go where our tenants head us to, if we believe it is the right thing”. Being the largest refrigerated cargo handler in the region, it moves over 80.000 tons per month; so, energy efficiency is important to their tenants and operations. It has been highlighted that “the company has invested over R\$500.000 in this segment in the past years, installing equipment to monitor the energy consumption, updating its ICT infrastructure to process the new data and inform its clients”. It was highlighted that the company has developed “a new brand from the ground up: the domestic Warehouse Management System (WMS) to exclusively work with our refrigerated cargo”. “Our operations are automated and customizable, adapted to the needs of our consumers, and are linked to our ERP, also support a variety of outputs so that they better fit our tenants needs”.

Based on the information from the interview and the documentation provided by the organization, we applied the Theoretical Model for Intelligent Logistics Platforms; the results are presented in the Table 5.

5.3 Logistics Platform 3 (LP 3)

The Logistics Platform 3 is located 6 km away from the São Francisco do Sul (Portonave) port. Since 2006, it operates in an area of 120.000 m² and serves the northern region of Santa Catarina, where metal-mechanic related activities are the most developed. The characterization of this logistics platform is presented in Table 6.

According to the manager, “the ICT infrastructure certainly is one of our key investments to attract and attain new tenants. They demand speed and security, especially those involved with customs clearance, and there is no other way than adaptation”. The ERP solution used to integrate the WMS, EDI and MIS modules is named SARA (Sistema de Armazenagem para Recintos Alfandegados), and it was developed and maintained by Totvs. The manager said: “this solution helped us to developed customized operations solutions providing full support, something impossible 10 years ago – we have improved our relationships by offering a more diverse portfolio of solutions, and our goal is never drop them”. Customs clearance is one of the key services provided: “By adapting our modules to support the RF ‘Linha Azul’ platform, we gained time when cargo is shipped to customs clearance”.

Based on the information from the interview and the documentation provided by the organization, we applied the Theoretical Model for Intelligent Logistics Platforms; the results are presented in Table 7.

Table 5. Attributes for Intelligence in LP 2

| Attributes for Intelligence in LP 2 | | | |
|--|---|-------------------|---|
| Integration | WMS, RFID, OCR and ERP are used to keep processes integrated | | |
| Synergy | Shared usage of reefer cargo containers and spaces | | |
| | Cooperation | Vertical | IT-integration for cargo scheduling (energy efficiency) |
| | | Horizontal | Transportation services (port-road-port) |
| Governance | Rules for occupation and use of reefer cargo space/operations Strategic Planning Modelling | | |

Table 6. Characterization of the LP 3

| | |
|---------------------------------|---|
| Location | São Francisco do Sul |
| Size | Medium (about 120,000 m ²). |
| Management | Private |
| Transportation Modals | Multimodal. Maritime (main); road (secondary); air (tertiary) |
| Intermodality | Yes |
| Main Companies and Goods | Metal-mechanic, steel industries, hospital equipment toys, heavy-machinery. |

Table 7. Attributes for Intelligence in LP 3

| Attributes for Intelligence in LP 3 | | | |
|--|---|-------------------|--|
| Integration | ERP, EDI, WMS, GIS, OCR and OMS are used to keep the processes integrated | | |
| Synergy | Sharing of Infrastructure, Equipment and Services on the Platform | | |
| | Cooperation | Vertical | ICT infrastructure supporting custom solutions to achieve better efficiency; |
| | | Horizontal | Use of shared space for tertiary services (labelling, packing) |
| Governance | Usage of EDI in all internal activities (except when required by the Federal Authorities Certifying quality processes Flexibility in operations | | |

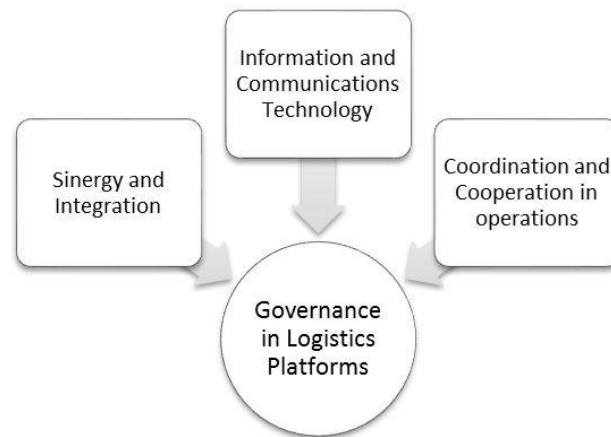


Figure 1. Increasing Governance of Intelligent Logistics Platforms

6. DISCUSSION

Governance is the process of distributing authority, allocating resources and managing relationships, behaviors or processes to achieve a desired outcome. In recent years, there has been a surge of papers on intermodal transport and intermodal terminals, but governance has been rarely addressed, partly because these facilities are usually small, with simple governance structures and low government involvement (Monios, 2015). Governance indicators for institutional in-land port-cities can be analyzed through two scopes: Coordination structure (horizontal and vertical) and Network cooperation (local/regional/inter-regional/national/worldwide). Branski and Lima (2013) defend that the good Governance indicators are the following: rules for occupation and use of space; identification and promotion of synergistic actions; and sharing benefits and responsibilities. None of these findings correlates governance to a modern and state-of-art ICT infrastructure. Varella et al. (2013) establish that ICT, Governance and Integration are important core competences in the strategic planning development of logistics platforms, but the relationship between them is vague.

A framework was developed based on: the literature analysis (Bandeira and Maçada, 2008; Branski et al., 2011; Varella et al., 2012; Branski and Lima, 2013; Carvalho et al., 2013; Dolci, 2013; Varella and Gonçalves, 2013; Monios, 2015), the findings obtained through the observation in the facilities, and the interviews to managers on aspects behind the ICT adoption. The framework considers the attributes that are substantial to the development of a governance policy focused on operations: Information and Communications Technology (ICT), Sinergy and Integration; and Coordination and Cooperation in operations. These attributes, part derived from the Intelligent Logistics Platforms study by Branski and Lima Jr, (2013) and part from the findings by Monios (2015), are presented in Figure 1, which shows the relationship of the attributes in the governance in logistics platforms.

ICT allows a quicker and more reliable processing of information, and a faster and continuous updating – as outlined by Dolci (2013) and said by the managers interviewed. By integrating the ERP modules to their tenants solutions (said by two managers), the idle

time was reduced significantly, minimizing associated costs as energy consumption and equipment depreciation. The most cited ICT to achieve a better governance, according to the interviewed managers, are the following: Enterprise Resource Planning (ERP); Warehouse Management Systems (WMS); Optical Character Recognition (OCR); Radio Frequency Identification (RFID), and Electronic Data Interface (EDI). The ERP is usually the most important piece of the ICT in a logistics platform because it acts as a centralized hub where all information and documentation goes through. The other pieces are tools (as EDI) or modules (WMS, TMS, etc.) of a larger information system. The use of RFID and OCR is linked to the necessity of tracking the products and goods; but it has been perceived that, in the analyzed facilities, their adoption is going beyond tracking and their decreasing price allows their use in internal operations (where it is exactly a pallet in a corridor, for example). All managers highlighted that their governance policies are linked to ICT, because of the nature of the operations and the need for accountability and easy access to the most concerning key performance indicator (KPIs) and related data. The identification of ICT as a key aspect for Intelligence in Logistics Platforms, allows to suggest: a) the inclusion of information and communication technology as a governance aspect; b) the ICT as a centralized hub, which is redundant, modular and highly adaptable to other ICT solutions of stakeholders, tenants and customers; and c) the use of electronic digital management systems in the management operations. Table 8 presents these attributes.

Table 8. Updated set of Attributes of Intelligence for Logistics Platforms

| Attributes for Intelligence | | | |
|------------------------------------|---|-------------------|--|
| Integration | Exchange of data between companies through networks and the synchronization of physical flows | | |
| Synergy | Sharing Infrastructure, Equipment and Services of the Platform | | |
| | Cooperation | Vertical | ICT-oriented arrangements Strategic and Operational arrangements |
| | | Horizontal | <ul style="list-style-type: none"> – Establishment of groups – Sharing warehouses, freight, assets and resources – Operating activities – Contractors and support – Knowledge – Co-brand |
| Governance | Rules for occupation and use of space Identification and promotion of synergistic actions Sharing benefits and responsibilities Centralized information and communication technology, which is redundant, modular and highly adaptable to the users Use of electronic digital management systems to support management operations | | |

7. FINAL CONSIDERATIONS

According to literature and the managers interviewed, governance is a major aspect for logistics platforms. Although important, it is still not a widely discussed topic, it lacks real information about basic aspects as the impact on performance and the effects of strategic planning. In this study, we identify some of the most used and cited ICT tools that aid platform managers to coordinate the operations and maintain clients, tenants and customers assured that their cargo is moving as expected. By elucidating the importance of ICT on the governance aspects in these facilities, we infer attributes that can help establish governance policies and update a Model for Intelligent Logistics Platforms adding ICT-related attributes to its framework.

Intelligent Platforms need establish rules for occupation and use of spaces that will guarantee their business vocation. Clients, Tenants, Stakeholders and Local Authorities must develop integration and synergy, requiring a strong governance structure that executes a proactive management and encourages the establishment of collaborative relationships between agents. ICT seems to be a good choice to increase governance in the design of a modern and state-of-art strategic planning for logistics platforms.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors thank the CNPq for the financial support granted on this research.

BIBLIOGRAPHIC REFERENCES

- ABRAHAMSSON, M., ALDIN, N., & STAHRÉ, F. (2003). Logistics platforms for improved strategic flexibility. *International Journal of Logistics: Research and Applications*, 6(3), 85-106.
- ALMOTAIRI, B. (2012). Integrated Logistics Platform The context of the port relational exchanges and systematic integration. *Doctorate Thesis* - Chalmers University of Technology.
- BANDEIRA, R. A. D. M.; MAÇADA, A. C. G. (2008) tecnologia da informação na gestão da cadeia de suprimentos: o caso da indústria gases. *Produção*, 18.2, p. 287-301. ISSN 0103-6513.
- BASTOS, S. Q. A., PEROBELLI, F. S., MACIEL, M. T., SANTOS, T. A. S. DOS. (2010) Plataforma logística: estudo da viabilidade de implantação em Juiz de Fora (MG) via caracterização das mercadorias transportadas entre Minas Gerais e Rio de Janeiro. *Revista de Economia*, 35.1, ISSN 0556-5782.
- BOILE, M., THEOFANIS, S., & STRAUSS-WIEDER, A. (2009). Feasibility of Freight Villages in the NYMTC Region: Task 3-Description of How a Typical Freight Village Works. Rutgers Center for Advanced Infrastructure and Transportation.
- BRANSKI, R. M.; CARVALHO, C. C. E LIMA JR. O. F. (2011) Modelo conceitual de

plataforma logística para a Região Metropolitana de Campinas. In *XXXI Encontro Nacional de Engenharia de Produção*

BRANSKI, R.M. E LIMA JR, O.F.L. (2013). Atributos para Plataformas Logísticas Inteligentes. *Anais do XXVII ANPET. Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte*. Belém do Pará.

CARVALHO, C. C. DE, BRANSKI, R. M., LIMA JR, O. F., & RUTKOWSKI, E. W. (2013). Atributos para caracterização de plataformas logísticas: estudo de casos na Espanha, Itália e Dinamarca. *TRANSPORTES*, 21(1), 23-33.

DOLCI, P. C. (2013). "Modelo para avaliar a influência dos investimentos em TI na governança da cadeia de suprimentos e o seu desempenho." *Doctorate Thesis – Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS)*.

EUROPLATFORMS EEIG. (2004) *logistics centres directions for use*.

MONIOS, J. (2015). Identifying governance relationships between intermodal terminals and logistics platforms. *Transport Reviews*, 35(6), 767-791.

SAYÃO, L. F. (2001). Modelos teóricos em Ciência da Informação: abstração e método científico. *Ciência da informação*, 30(1), 82-91.

SILVA, R. M. DA; SENNA, E. T. P.; LIMA JR, O. F. (2014). "Proposição de indicadores de desempenho a serem utilizados na governança de plataformas logísticas: uma pesquisa survey no Brasil." *Espacios* 35(4).

VARELLA, L.; NETO, T. M.; FRAZZON, E. M.; GONÇALVES, M. B.; (2012) Competências Essenciais na Operação de Plataformas Logísticas Inteligentes. In: *XVII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito Transporte Y Logística*. PANAM, 2012, Santiago, Chile.

VARELLA, L.; BRANSKI, R. M.; GONÇALVES, M. B. (2015). Intelligent Logistics Platforms Models for Three Brazilian Regions. *European Transport Conference 2015*, Frankfurt , Germany.

VARELLA, L.; GONÇALVES, M. B. (2013). Information Technology as the Main Competence in the Design of the Strategic Planning of Logistics Platforms. *Journal of technology management & innovation*, 8(3), 160-172

WEISBROD, R. E., SWIGER, E., MULLER, G., RUGG, F. M., & MURPHY, M. K. (2002). Global freight villages: A solution to the urban freight dilemma. In *Proceedings of the 2002 meeting of the Transportation Research Board*.

26 Localización de parques industriales con enfoque de optimización y análisis multicriterio en México

Luis Enrique Vázquez Montes

Esther Segura Pérez

Universidad Nacional Autónoma de México, México

RESUMEN

Está comprobado que el desarrollo tecnológico y económico de una región tiene un gran impacto en la calidad de vida de las personas que se encuentran dentro de ella, una de las estrategias con grandes beneficios, es la formación de parques industriales que permitan ese desarrollo.

Una pregunta que puede surgir de lo antes expuesto es: ¿cómo elegir la localización de parques industriales? Se identifica a través del análisis de la literatura que existen básicamente dos enfoques para la correcta localización, uno de ellos es el análisis multicriterio (que deja a un lado el enfoque de la optimización) y otro el de la optimización matemática a través del Diseño de Redes de Distribución (DRD). En este trabajo se propone una metodología híbrida novedosa que incorpora ambos enfoques que consiste de tres etapas: obtención y análisis de información, desarrollo e implementación del algoritmo de solución, y por último análisis de resultados y propuesta de escenarios. La etapa de desarrollo e implementación del algoritmo consiste en macro-localización y micro-localización, mostrando una metodología que permite la localización de parques industriales a gran escala (a nivel estado) a través de un análisis multicriterio y a nivel zona (provincia, municipio, localidad) a través de la optimización con la aplicación del modelo de la P- mediana. La metodología es trasladable y aplicable para localizar parques industriales como este caso, o bien empresas de cualquier giro. Uno de los grandes retos es contar con las bases de datos adecuadas para que la metodología muestre su desempeño.

Palabras clave: Localización, Parques industriales, Multicriterio-ELECTRE, P-mediana

1. INTRODUCCIÓN

El problema de localización (LP) por sus siglas en inglés (Owen y Daskin, 1998; Farahani y Hekmatfar, 2009) consiste en determinar una localización adecuada de alguna infraestructura (planta, sitio, instalación) en un área determinada, teniendo en cuenta las preferencias de la persona que tomará la decisión y las limitaciones existentes. Tiene un carácter universal y puede referirse a diferentes categorías de sitios/instalaciones (Farahani y Hekmatfar, 2009; Farahani, et al, 2010). Se han desarrollado diferentes enfoques para la solución de este problema, incluyendo programación matemática (Klose y Drexler, 2005), la

evaluación y la clasificación de los sitios considerados (Özcan, et al, 2011; Korpelaa y Tuominen, 1996; Awasthi et al., 2011).

En este artículo se ubican lugares con alto potencial de inversión de parques industriales en México, tomando diferentes niveles de localización en la solución del problema. En el primer nivel se hará una macro-localización utilizando un enfoque multicriterio con el método ELECTRE que nos permita identificar a gran escala, las entidades federativas de la república mexicana (EFRM) que cuenten con un alto potencial de inversión en parques industriales (APIPI). Después de tener la clasificación de los mejores estados con APIPI, en un segundo nivel de análisis de localización, se realiza un mapeo de todas las grandes industrias que haya dentro de los estados seleccionados previamente, teniendo la localización de estas industrias y la cantidad de ellas, es posible hacer una micro-localización APIPI pero ahora en función de la demanda (cantidad de industrias) y la distancia de los municipios que contienen estas industrias, para solucionar el problema de micro-localización se utiliza el algoritmo miope que resuelve el modelo de la p-mediana. Cabe mencionar que la metodología propuesta en este artículo en comparación con otros trabajos de localización como Jacek ŽAK, 2014 y Awasthi et al., 2010, es que no sólo se hace un análisis de macro-localización, si no que se va más allá, realizando también un análisis de micro-localización, lo que hace a esta metodología una propuesta innovadora.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el año 2014 las expectativas del desarrollo económico para México no se cumplieron, ya que sólo hubo un crecimiento del 2.1% respecto a 2013 y según pronósticos, para el 2015 y 2016 seguirá en los mismos intervalos de crecimiento del 2.0% al 2.8%, que comparado con al crecimiento poblacional, se concluye que prácticamente no hemos crecido económicamente. Una de las maneras en las que se puede tener un crecimiento económico alto y que impacte directamente en el bolsillo de los pobladores de una región específica, es la inversión de grandes empresas y complejos industriales que permita en primera instancia, la generación de empleos directos e indirectos, el desarrollo económico y social de la población, inversión gubernamental en infraestructura y nueva inversión privada. Todo esto deriva en el crecimiento económico del país y la calidad de vida de la población. Pero ¿dónde se pueden ubicar estos complejos industriales? La respuesta va más allá de una necesidad económica, se tiene que hacer un amplio análisis que permita decidir en función de diferentes criterios, las localizaciones con APIPI.

2.1 Justificación y objetivo de estudio

La preocupación que se tiene ante la posibilidad de hacer una mala elección en la localización de los complejos industriales es enorme, debido a la cantidad de dinero que se invierte en ellos, es por ello que se realiza este trabajo, en el cual se localizan diferentes lugares con APIPI en función de los criterios más importantes, según inversionistas experimentados y un completo análisis matemático, que al final permite reducir la

incertidumbre al momento de tomar una decisión.

3. REVISIÓN DE LA LITERATURA

3.1 Modelos de localización

Los problemas de localización surgen de la necesidad de encontrar el sitio más conveniente para ubicar instalaciones como: centros de distribución, plantas de producción, vertederos de desechos, estaciones de bomberos y policías, entre muchos más. De manera general, el problema de localización se puede enunciar como (Daskin, 1995): “dada la localización de cada usuario, su demanda y los costos (tiempo, distancia, etc.) de transporte en la región de interés, determinar el número de servicios, la ubicación geográfica y la capacidad de cada uno de ellos de tal forma que se optimicen los costos de transporte, de funcionamiento, etc”. Los modelos de localización han sido estudiados desde los años 70. Los problemas básicos más nombrados son citados por Daskin (1995), que clasifica los modelos de localización como: continuos, en redes y modelos discretos. Los modelos basados en cobertura y los modelos basados en la p-mediana se encuentran dentro de los modelos discretos. Este trabajo hace uso de los modelos de la p-mediana para el problema de micro-localización.

3.1.1 Modelos multicriterio

Desde un punto de vista científico, la decisión multi-criterio aparece en el campo de la Economía, ligada a los trabajos de los economistas a finales del siglo XIX y principios del XX sobre el comportamiento de los consumidores a la hora de elegir en la compra de un producto. Estas investigaciones económicas son las precursoras del concepto de decisión multicriterio.

A través del tiempo se han desarrollado diferentes métodos para solucionar problemas con un enfoque multicriterio, por mencionar algunos se encuentran.

- Dirección científica del Grupo SEMA. Método ELECTRE (“ELimination Et Choix Traduisant la REalité”, “ELimination and Choice Expressing REality”) 1968
- Benayoun y Tergny (1969). Método Interactivo STEP
- Keeney y Raïffa (1976). Método de la Utilidad Multiatributo (MAUT)
- T Saaty (1980). “Analytic hierarchy process” (AHP)
- T Saaty (2003). “Analytic network process” (ANP)

Para dimensionar la importancia de los modelos multicriterio, entre 1987-1992 se publicaron 1216 artículos, 208 libros, 31 revistas y 143 conferencias.

La decisión multicriterio es un campo de estudio centrado en el desarrollo de procedimientos matemáticos y avanzados métodos de cómputo que apoyan en la toma de decisiones, resolviendo problemas con múltiples criterios (Figueira et al., 2005; Vincke, 1992). Un problema de decisión con criterios múltiples es una situación en la que, después de haber

definido un conjunto de acciones / variantes / soluciones (A) y una familia coherente de criterios (F), entonces se procede a (Vincke, 1992):

- a) determinar el mejor subconjunto de acciones / variantes / soluciones de acuerdo con F (problema de elección),
- b) se dividen en subconjuntos A que representan determinadas clases de acciones / variantes / soluciones, de acuerdo con determinadas reglas de clasificación (problema de clasificación),
- c) Acciones de rango / variantes / soluciones de la mejor a la peor, de acuerdo a F.

Con base en la definición citada anteriormente se puede determinar fácilmente a los principales componentes de cada problema de decisión con múltiples criterios, es decir, un conjunto de acciones / variantes / soluciones A y una familia coherente de criterios F (Roy, 1990; Vincke, 1992;)

Algunos trabajos desarrollados con base en los modelos multicriterios y que están enfocados a la localización de algún componente estructural de manera macro, se encuentran en Jacek ŻAK, 2014 y Awasthi et al, 2010. Este trabajo se enfoca en el método ELECTRE para la solución del problema de macro-localización.

3.1.1.1 Método ELECTRE

El método ELECTRE (en francés: “ELimination Et Choix Traduisant la REalité”, en inglés: “ELimination and Choice Expressing the Reality”), básicamente, consiste en un procedimiento para reducir el tamaño del conjunto de soluciones eficientes. Tal reducción se realiza por medio de una partición del conjunto eficiente en un subconjunto de alternativas más favorables para el centro decisor (el núcleo) y en otro subconjunto de alternativas menos favorables. Para abordar tal tarea, se introduce el concepto de «relación de sobreclasificación» (“outranking relationship”) que es consustancial al ELECTRE en todas sus variantes (Mousseau y Roy, 2005).

Una elección o alternativa A_i sobreclasifica (“outranks” - S representa la relación de sobreclasificación) a otra alternativa A_k cuando para los atributos considerados, el enunciado «la alternativa A_i es al menos tan buena como la alternativa A_k » es válido. Considerando dos alternativas cualesquiera, pueden presentarse las siguientes cuatro situaciones.

- 1.- A_i S A_k y A_k No S A_i , entonces A_i es estrictamente preferida a A_k (A_i P A_k).
- 2.- A_k S A_i y A_i No S A_k , entonces A_k es estrictamente preferida a A_i (A_k P A_i).
- 3.- A_i S A_k y A_k S A_i , entonces A_i es indiferente a A_k (A_i I A_k).
- 4.- A_i No S A_k y A_k No S A_i , entonces A_i es incomparable a A_k (A_i R A_k).

La sobreclasificación se establece con base a dos conceptos: concordancia y discordancia. La concordancia cuantifica hasta qué punto para un elevado número de atributos A_i es

preferida a A_k . Por otra parte, la discordancia cuantifica hasta qué punto no existe ningún atributo para el que A_k es mucho mejor que A_i . Para que la alternativa A_i sobreclasifique a la alternativa A_k y, por tanto, forme parte del núcleo o subconjunto de alternativas más favorables, es necesario que la concordancia entre A_i y A_k supere un umbral mínimo establecido y que, asimismo, la discordancia entre A_i y A_k no supere otro umbral también establecido a priori. Cuando esto sucede, puede decirse que la alternativa A_i es preferida a la alternativa A_k desde casi cualquier punto de vista, aunque ello no implique que A_i domine, desde un punto de vista paretiano a A_k .

La principal ventaja de la relación de sobreclasificación es que en ella no subyace necesariamente el supuesto de transitividad de preferencias o de comparabilidad, que sí subyace a cualquier enfoque basado en funciones de utilidad. Así, si $A_1 \succ A_2$ y $A_2 \succ A_3$ esto no implica necesariamente que $A_1 \succ A_3$. Así el ELECTRE reconoce con acierto que las razones que llevan al centro decisor a preferir A_1 a A_2 y aquellas que le llevan a preferir A_2 a A_3 pueden ser muy diferentes y no conducir, por tanto, a que A_1 sea preferida a A_3 .

3.1.1.1.1 Estructura Algorítmica del Método ELECTRE

Paso 1. Se parte de un conjunto de m alternativas $A = \{A_i\}$ y un conjunto de n criterios $C = \{C_j\}$, así como de un vector de pesos W .

Paso 2. A partir de la matriz decisional ($r_{ij} = C_j(A_i)$) y del vector de pesos W se calcula la matriz de índices de concordancia de la siguiente manera: el índice de concordancia $c(i,k)$ entre las alternativas A_i y A_k se obtiene sumando los pesos asociados a los criterios en los que la alternativa i es mejor que la alternativa k ; en caso de empate se asigna la mitad del peso a cada una de las alternativas.

$$c(i, k) = \sum_{j; C_j(A_i) > C_j(A_k)} W_j + \frac{1}{2} \sum_{j; C_j(A_i) = C_j(A_k)} W_j ; 0 \forall \text{ otra alternativa} \quad (1)$$

Paso 3. Se procede a normalizar los elementos de la matriz decisional inicial.

Paso 4. A partir de la matriz decisional normalizada, multiplicando cada columna de la misma por el peso preferencial correspondiente se obtiene la matriz decisional normalizada y ponderada.

Paso 5. De la matriz decisional normalizada y ponderada se deducen los índices de discordancia de la siguiente manera. El índice de discordancia $d(i,k)$ entre las alternativas A_i y A_k se calcula como la diferencia mayor entre los criterios para los que la alternativa i está dominada por la k , dividiendo seguidamente dicha cantidad por la mayor diferencia en valor absoluto entre los resultados alcanzados por la alternativa i y la k . A partir de los índices de discordancia se construye la matriz de índices de discordancia.

$$d(i, k) = \frac{\max_{j; C_j(A_i) < C_j(A_k)} |C_j(A_i) - C_j(A_k)|}{\max_j |C_j(A_i) - C_j(A_k)|} \quad (2)$$

Paso 6. Se fija un umbral mínimo c - para el índice de concordancia, así como un umbral máximo d - para el índice de discordancia.

Paso 7. Se calcula la matriz de dominancia concordante de la siguiente manera. Cuando un elemento de la matriz de índices de concordancia (paso 2) es mayor que el valor umbral c - (paso 6) en la matriz de dominancia concordante se escribe un uno, en caso contrario, se escribe un cero. Denominando V^c a la matriz de dominancia concordante cada uno de sus elementos se obtiene siguiendo la siguiente regla:

$$Si \ c(i, k) > c \rightarrow V_{ik}^c = 1, si \ c(i, k) \leq c \rightarrow V_{ik}^c = 0 \quad (3)$$

Paso 8. Se calcula la matriz de dominancia discordante de la siguiente manera. Cuando un elemento de la matriz de índices de discordancia (paso 5) es menor que el valor umbral d - (paso 6) en la matriz de dominancia discordante se escribe un uno, en caso contrario, se escribe un cero. Denominando V^d a la matriz de dominancia discordante cada uno de sus elementos se obtiene siguiendo la siguiente regla:

$$Si \ d(i, k) < d \rightarrow V_{ik}^d = 1, si \ d(i, k) \geq d \rightarrow V_{ik}^d = 0 \quad (4)$$

Paso 9. Se comparan cada uno de los elementos por fila de las dos matrices, se suma el número de coincidencias=1 por fila. Se hace lo mismo, pero para cada una de las columnas.

Paso 10. Se hace la diferencia entre la suma de la fila 1 y la columna 1.

Paso 11. Por último, se jerarquiza de mayor a menor las alternativas en función del resultado del paso 10.

3.2 Modelo de la P-mediana

En los modelos anteriores se habló siempre de la maximización de algún beneficio, en particular de la demanda cubierta por las instalaciones. En este caso se da un giro en la concepción del modelo centrándose en la minimización de los costos. En muchos casos el costo de cubrir la demanda es directamente proporcional a la distancia de las instalaciones, pero en muchos casos no existe una relación lineal, creciendo de forma cóncava o convexa.

El objetivo principal del problema de la P-mediana es encontrar la localización de instalaciones de forma tal que se minimice el costo del servicio (costo asociado a las distancias entre los nodos de demanda y las instalaciones). Daskin (2008) plantea algunos modelos teóricos en los cuales se presenta la minimización de las distancias ponderadas

$(h_i d_{ij})$ donde h es la demanda conocida en el nodo i , y d_{ij} es la distancia entre los nodos i y j , sujeto a que el número de instalaciones o centros de distribución a localizar (X_j) sea igual a P , que cada cliente final (i) sea suministrado por únicamente una instalación o CEDIS (j) y que un cliente es asignado a un CEDIS siempre y cuando este sea abierto o localizado en el sitio. Se observa a través de las Ecuaciones 5 a 10 la formulación matemática del problema de la p -mediana que resuelve las decisiones de localización y asignación.

$$Min \sum_i \sum_j h_i d_{ij} Y_{ij} + f_j X_j \quad (5)$$

s. a.

$$\sum_j Y_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (6)$$

$$\sum_j X_j = P \quad (7)$$

$$Y_{ij} - X_j \leq 0 \quad \forall i, j \quad (8)$$

$$Y_{ij} = 1, 0 \quad (9)$$

$$X_j = 1, 0 \quad (10)$$

4. METODOLOGÍA DE LOCALIZACIÓN

En este estudio se proponen 3 fases para la localización de parques industriales, en un primer acercamiento se utilizará el método Delphi para recabar información respecto a los criterios más importantes a considerar para la localización de los parques industriales, así como la ponderación o los pesos para estos criterios de macro-localización, esta información se obtendrá de expertos en el tema de inversiones o de empresarios que cuenten con los conocimientos y experiencia necesarias en el tema. Hay ocasiones en las que se requiere contemplar subcriterios para estructurar un criterio o subsubcriterios que estructuren subcriterios con el fin de obtener una mejor aproximación. Los criterios a considerar son:

1. Disponibilidad de agua: Para cualquier proceso industrial se necesita agua, ya sea para usarse en sistema de enfriamiento, como parte del proceso, actividades sanitarias, etc. Este criterio se estructura con los siguientes subcriterios:

- Industria autoabastecida (hm^3)
- Caudal potabilizado (l/s)
- Caudal de aguas industriales tratadas (m^3/s)
- Población con servicio de agua potable (%)

- Porcentaje de viviendas particulares habitadas con disponibilidad de drenaje (%)

2. Facilidad gubernamental: Se tiene que evaluar si el EFRM en el que se cuenta con una posible inversión ofrece facilidades para abrir empresas, respecto a la cantidad de trámites, el tiempo empleado y el costo. Estas características están integradas en los siguientes subcriterios:

- Facilidad para abrir una empresa
 - Número de trámites
 - Tiempo (días)
 - Costo (% del ingreso per cápita)
- Permisos de construcción.
 - Número de trámites
 - Tiempo (días)
 - Costo (% del ingreso per cápita)
- Registro de propiedad.
 - Número de trámites.
 - Tiempo (días)
 - Costo (% del ingreso per cápita)
- Cumplimiento de contratos.
 - Número de trámites
 - Tiempo (días)
 - Costo (% del ingreso per cápita)

3. Infraestructura de transporte: Es necesario verificar si se cuenta con la suficiente infraestructura de transporte que permita una buena comunicación comercial y movilidad personal. Este criterio se estructura con los siguientes subcriterios:

- Longitud de red carretera pavimentada
 - Troncales federales (Km)
 - Alimentadoras (Km)
 - Caminos (Km)
- Servicio de autotransporte
 - Cantidad de unidades de transporte enfocadas al pasaje
 - Cantidad de unidades de transporte enfocadas al turismo
 - Terminales de pasajeros
- Longitud de vías férreas Km
- Puertos y terminales portuarias por litoral
 - Cantidad de puertos pequeños
 - Cantidad de puerto de altura
- Transporte aéreo
 - Cantidad de aeropuertos

- Cantidad de aeronaves

4. Educación: Se tiene que conocer el nivel educativo, científico y tecnológico que hay en la EFRM, ya que permite verificar si se contará con la mano de obra capacitada para lograr sus objetivos. Este criterio se estructura con los siguientes subcriterios:

- Número de Universidades
 - Cantidad de universidades públicas
 - Cantidad de universidades privadas
- Grado promedio de escolaridad
- Becas nuevas nacionales del CONACyT
- Cantidad de artículos publicados
- Cantidad de citas científicas
- Impacto de los artículos
- Cantidad de miembros del Sistema Nacional de Investigadores

5. Seguridad: A pesar de que en todo parque industrial se cuenta con un departamento de seguridad dentro del complejo, fuera del complejo se debe contemplar una mínima posibilidad de que ocurra algún incidente. Se contempla un índice de inseguridad.

- Cantidad de agencias del Ministerio Público
- Cantidad de agentes del Ministerio Público
- Indicador de denuncias ante el ministerio público por cada 100 habitantes
- Indicador de delitos registrados por cada 100 habitantes
- Indicador de delitos procesados por cada 100 habitantes

6. Industria: Se considera que entre más industria haya en la EFRM, es un reflejo del potencial industrial y posibles fuentes de comercialización. Este criterio se estructura con los siguientes subcriterios:

- Cantidad de parques industriales
- Cantidad de unidades económicas manufactureras mayores a 251 trabajadores
- Total de ingresos de las unidades económicas dedicadas a la manufactura

7. Índice de desarrollo humano: Este índice refleja salud, educación e ingresos de las EFRM.

8. Cantidad de inversión: Para la construcción del complejo industrial se requieren diversos recursos materiales, como el terreno donde se construirá, se trabaja bajo la premisa de que entre los materiales hay un precio estándar mientras que en la compra de metro cuadrado no, ya que hay una gran variación entre el precio de metro cuadrado por EFRM. Se toma un estándar del precio por metro cuadrado de cada una de las capitales de los EFRM (\$/m²).

9. Turismo:

- Cantidad de entradas al país de extranjeros y nacionales
- Cantidad de turistas
- Cantidad de establecimientos
- Cantidad de cuartos

Una vez que se obtiene la información referente a los criterios, subcriterios o subsubcriterios y los pesos de cada uno de ellos, se procede a elaborar una matriz de comparación en la cual se refleja la relación que existe entre el criterio (F) y cada una de las EFRM (A). Teniendo esta información ordenada, se emplea cualquiera de los métodos de análisis multicriterio para resolverlo, para este trabajo se ocupa el método ELECTRE. Del análisis de macro-localización se extraen los 5 estados con mayor APIPI, en estos EFRM se realiza la tercer y última etapa, que es el análisis de micro-localización, con la implementación de un algoritmo miope que resuelve el modelo de la p-mediana. En esta etapa se realiza un mapeo de todas las grandes industrias (mayores a 251 trabajadores) que haya dentro de los estados seleccionados previamente, se hace una micro-localización APIPI pero ahora en función de la demanda (cantidad de industrias) y la distancia de los municipios que contienen estas industrias, esta distancia se obtiene sumando la longitud de carretera que hay desde el municipio (i) hasta el municipio (j).

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 1, se observan los criterios establecidos en la metodología y la ponderación asignada a cada uno de ellos por parte de expertos.

Siguiendo con la metodología descrita en este trabajo, se implementa el método ELECTRE para el análisis de macro-localización. Se obtienen 5 EFRM con un alto APIPI:

1. Nuevo León
2. Guanajuato
3. Aguascalientes
4. San Luis Potosí
5. México

Continuando con la metodología propuesta, se lleva a cabo la micro-localización, en primera instancia se recopilan los datos necesarios para implementar el algoritmo miope que resuelve el modelo de la p-mediana, estos datos son la cantidad de unidades económicas manufactureras por municipio (se contemplan los municipios con mayor demanda) y la distancia en Km que existe entre cada uno de estos municipios. Para la ilustración de la metodología de micro-localización, se tomará como base el estado de Nuevo León. En la Tabla 2, se observa la demanda en cada municipio y las distancias en Km entre todos y cada uno de los municipios del estado de Nuevo León.

En la Tabla 3 se multiplica la demanda por la distancia que existe entre cada municipio, es decir, se pondera la demanda con la distancia entre los municipios, se suman las columnas de cada municipio y se escoge el mínimo de esta suma, por lo que el municipio de Monterrey es la alternativa seleccionada ya que es en donde las distancias promedio entre municipios resulta mínima. En este caso se localiza un único parque industrial, sin embargo, el algoritmo permite realizar la localización de más parques industriales.

Tabla 1. Relación de criterios con ponderación

| No | Criterio | Peso | Subcriterio | Peso | Subsubcriterio | Peso |
|----|-------------------------|------|---|------|----------------------------------|------|
| 1 | Agua | 8 | Industria autoabastecida (hm ³) | 6 | | |
| | | | Caudal potabilizado (l/s) | 8 | | |
| | | | Caudal de aguas industriales tratadas (m ³ /s) | 5 | | |
| | | | Población con servicio de agua potable (%) | 8 | | |
| | | | Viviendas particulares habitadas con drenaje (%) | 4 | | |
| 2 | Facilidad gubernamental | 7 | Facilidad para abrir empresa | 5 | Número de trámites | 4 |
| | | | | | Tiempo (días) | 4 |
| | | | | | Costo (% del ingreso per cápita) | 4 |
| | | | Permisos de construcción | 6.5 | Número de trámites | 4 |
| | | | | | Tiempo (días) | 4 |
| | | | | | Costo (% del ingreso per cápita) | 4 |
| | | | Registros de propiedad | 6 | Número de trámites | 4 |
| | | | | | Tiempo (días) | 4 |
| | | | | | Costo (% del ingreso per cápita) | 4 |
| | | | Cumplimientos de contrato | 8.5 | Número de trámites | 4 |
| | | | | | Tiempo (días) | 4 |
| | | | | | Costo (% del ingreso per cápita) | 4 |

| No | Criterio | Peso | Subcriterio | Peso | Subsubcriterio | Peso |
|------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|------|---|------|
| 3 | Infraestructura de transporte | 10 | Longitud de carreteras pavimentadas | 10 | Troncales Federales (Km) | 9 |
| | | | | | Carreteras alimentadoras estatales (Km) | 8 |
| | | | | | Carreteras caminos rurales (Km) | 7 |
| | | | Servicio público federal de autotransporte de pasaje | 7 | Unidades de transporte enfocadas al pasaje | 8 |
| | | | | | Unidades de transporte enfocadas al turismo | 7 |
| | | | Terminales de pasajeros | 8 | Longitud de vías férreas | 9 |
| | | | | | Puertos y terminal portuarias por litoral | 7 |
| Cantidad de puertos pequeños | 3 | | | | | |
| Transporte aéreo | 7 | Cantidad de aeropuertos | 6 | | | |
| | | Cantidad de aeronaves | 8 | | | |
| 4 | Educación | 8 | Cantidad de Universidades | 8 | Universidades públicas | 8 |
| | | | | | Universidades privadas | 7 |
| | | | Grado promedio de escolaridad | 7 | Becas Nuevas nacionales CONACyT | 6 |
| | | | | | Miembros del SNI | 7.5 |
| 5 | Seguridad | 6 | Cantidad de agencias del ministerio público | 8 | | |
| | | | | | | |
| | | | Indicador de denuncias ante el ministerio público cada 100 habitantes | 5 | | |
| | | | | | | |
| | | | Indicador de Delitos procesados cada 100 habitantes | 8 | | |

| No | Criterio | Peso | Subcriterio | Peso | Subsubcriterio | Peso |
|----|-----------|------|--|------|----------------|------|
| 6 | Industria | 9 | Cantidad de parques industriales | 6 | | |
| | | | Unidades económicas manufactureras mayores a 251 trabajadores | 8 | | |
| | | | Total de ingresos de las unidades económicas dedicada a la manufactura | 9 | | |
| 7 | IDH | 5 | | | | |
| 8 | Inversión | 7 | | | | |
| 9 | Turismo | 6 | Cantidad de entradas al país de extranjeros y nacionales | 9 | | |
| | | | Cantidad de turistas | 8 | | |
| | | | Cantidad de establecimientos | 6 | | |
| | | | Cantidad de cuartos | 7 | | |

Elaboración propia

Tabla 2. Demanda (Unidades económicas) y distancias Km, de los municipios en Nuevo León

| | Demanda | General Escobedo | General Zuazua | Guadalupe | Monterrey | San Nicolas de los Garza | San Pedro Garza García | Santa Catarina |
|--------------------------|---------|------------------|----------------|-----------|-----------|--------------------------|------------------------|----------------|
| General Escobedo | 23 | | 28.2 | 18.6 | 11.9 | 5.6 | 20.6 | 23.3 |
| General Zuazua | 14 | 28.2 | | 28.8 | 33.1 | 27.1 | 43.8 | 46.4 |
| Guadalupe | 52 | 18.6 | 28.8 | | 11 | 13.5 | 21.6 | 24.2 |
| Monterrey | 47 | 11.9 | 33.1 | 11 | | 8.6 | 10.8 | 13.4 |
| San Nicolas de los Garza | 44 | 5.6 | 27.1 | 13.5 | 8.6 | | 18.7 | 21.4 |
| San Pedro Garza García | 12 | 20.6 | 43.8 | 21.6 | 10.8 | 18.7 | | 2.8 |
| Santa Catarina | 41 | 23.3 | 46.4 | 24.2 | 13.4 | 21.4 | 2.8 | |

Elaboración propia

Tabla 3. Método de la P-mediana para localización de municipios con factibilidad de inversión

| | General Escobedo | General Zuazua | Guadalupe | Monterrey | San Nicolás de los Garza | San Pedro Garza García | Santa Catarina |
|--------------------------|------------------|----------------|-----------|-------------|--------------------------|------------------------|----------------|
| General Escobedo | 0 | 649 | 428 | 274 | 128.8 | 473.8 | 536 |
| General Zuazua | 395 | 0 | 403 | 463 | 379.4 | 613.2 | 650 |
| Guadalupe | 967 | 1498 | 0 | 572 | 702 | 1123 | 1258 |
| Monterrey | 559 | 1556 | 517 | 0 | 404.2 | 507.6 | 630 |
| San Nicolás de los Garza | 246 | 1192 | 594 | 378 | 0 | 822.8 | 942 |
| San Pedro Garza García | 247 | 526 | 259 | 130 | 224.4 | 0 | 33.6 |
| Santa Catarina | 955 | 1902 | 992 | 549 | 877.4 | 114.8 | 0 |
| Suma | 3369 | 7323 | 3193 | 2366 | 2716.2 | 3655.2 | 4049.6 |

Fuente: Elaboración propia

6. CONCLUSIONES

Se concluye que la metodología propuesta que se compone por un análisis de macro-localización y un análisis de micro-localización es útil y novedosa para la localización de parques industriales, y es tan flexible que permitirá no sólo la localización de éstos, si no que podrá localizar cualquier parque industrial en función de las necesidades y características de estos componentes. La ventaja de la metodología propuesta no sólo radica en la cantidad de criterios tomados en cuenta en la macro-localización y la flexibilidad que tiene para localizar otros componentes estructurales, sino en la precisión con la que se realiza el análisis, ya que permite localizar los parques industriales a escala municipal, logrando con esto la mejor toma de decisiones. Como trabajos futuros se debe considerar el espacio disponible en cada uno de los municipios, es decir se debe realizar un análisis de micro-micro-localización (evaluación de los terrenos disponibles en el municipio seleccionado a través de criterios como: existencia de terrenos, tamaño del terreno y distancia con carreteras importantes, costos de adquisición o renta, etc.) permitiendo así un análisis más exacto de localización y el inicio del proyecto de infraestructura.

REFERENCIAS

- AWASTHI, A., CHAUHAN, S.S. Y GOYAL, S.K. (2010). *A multi-criteria decision-making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty*. Mathematical and Computer Modelling. Pp.101-106.
- AWASTHI A., CHAUHAN S.S. Y GOYAL S.K. (2011). *A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty*. Mathematical and Computer Modelling, 53, 98 – 109.
- DASKIN M.C. (2008). *What you should know about location modeling*. Published online 28 March 2008 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com). DOI 10.
- DASKIN M.C. (1995). *Network and Discrete Location. Models, Algorithms, and Applications*. Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995. ISBN: 0-471-01897-X.
- FARAHANI R., STEADISEIFI M. S. Y ASGARI N. (2010). *Multiple criteria facility location problems: A survey*. Applied Mathematical Modelling, 34, 1689-1709.
- FARAHANI R.Z. Y HEKMATFAR M. (Eds.) (2009). *Facility Location: Concepts, Models, Algorithms and Case Studies*. Heidelberg: Physica-Verlag.
- FIGUEIRA J., GRECO S. Y EHRGOTT M. (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis. State of the Art Surveys*. New York: Springer.
- JACEK ŻAK Y SZYMON W. (2014). *The selection of the logistics center location based on MCDM/A Methodology*. 17th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, EWGT2014, 2-4 July 2014, Sevilla, Spain.
- KLOSE A. Y DREXL A. (2005). *Facility location models for distribution system design*. European Journal of Operational Research, 162, 1, 4-29.
- KORPELAA J. Y TUOMINEN M. (1996). *A decision aid in warehouse site selection*. International Journal of Production Economics, 45, 169 – 180.

- MOUSSEAU, V. Y ROY, B. (2005): *Electre Methods*. International Series in Operations Research and Management Science. Springer.
- OWEN S. Y DASKIN M. (1998). *Strategic facility location: A review*. European Journal of Operational Research, 111, 423 – 447.
- ÖZCAN T., ÇELEBI N. Y ESNAF S. (2011). *Comparative analysis of multi-criteria decision-making methodologies and implementation of a warehouse location selection problem*. Expert Systems with Applications, 38, 9773 – 9779.
- ROY B. (1990). *Multiple Criteria Decision Aiding* (in Polish), Warsaw: Wydawnictwo Naukowe – Techniczne.
- VINCKE P. (1992). *Multicriteria Decision-Aid*. New York: John Wiley & Sons.

27 Análisis de la capacidad y niveles de servicio de la vía como factores incidentes en los tiempos logísticos usando dinámica de sistemas

Conrado Augusto Serna Urán

Martín Darío Arango Serna

Miguel A. Ortiz

Universidad Nacional de Colombia, Medellín

RESUMEN

En el artículo se modela el comportamiento dinámico de los tiempos logísticos como factor de desempeño en el transporte de carga por carretera. El análisis se hace bajo un enfoque sistémico que integra las variables necesarias para el cálculo de capacidad y niveles de servicio de la vía, así como otros factores como: la demanda, el parque automotor para el transporte de carga, entre otros. El modelo es diseñado bajo dinámica de sistemas y se toma la vía que une la ciudad de Medellín con Buenaventura para hacer los análisis respectivos.

Palabras clave: Niveles de servicio, dinámica de sistemas, tiempos logísticos.

1. INTRODUCCIÓN

El transporte por carretera es uno de los principales modos de transporte de mercancías en Colombia, así se transporta cerca del 71% de la carga que se mueve internamente (Fedesarrollo, 2013), lo que hace de las autopistas y otras vías principales de transporte por carretera, uno de los factores claves para mejorar la competitividad del país. En términos logísticos esta competitividad se asocia a la eficiencia logística con la que se transportan las mercancías, la cual está directamente relacionada con los costos y tiempos logísticos que se logran cuando se transporta una unidad de carga desde un origen a su destino.

El fortalecimiento de la infraestructura y el mejoramiento de los niveles de servicio en la vía contribuyen en el aumento de la eficiencia logística. Sin embargo, es necesario contar con herramientas de análisis que permitan integrar diversos factores que condicionan el logro de esta meta. Lo anterior significa que deben ser utilizados métodos de evaluación sistémicos, en los que no sólo se tenga una medida de gestión logística, sino todo un sistema de evaluación que pueda ser utilizado para hacer comparaciones y tomar decisiones bajo diversos escenarios de oferta y demanda. Como acercamiento a este paradigma de evaluación, en el presente estudio se modela el comportamiento dinámico de los tiempos logísticos en una autopista de Colombia y se integra el procedimiento para el cálculo de los niveles de servicio de la vía, que tiene una incidencia directa sobre estos tiempos. El modelo

es diseñado bajo dinámica de sistemas y se toma la vía terrestre que une la ciudad de Medellín con el Puerto de Buenaventura para hacer los análisis respectivos.

2. USO DE LA DINÁMICA DE SISTEMAS EN SISTEMAS DE TRANSPORTE

Salini y Karsky (2015) y Karsky y Salini (2003) usan la dinámica de sistemas para evaluar el desempeño logístico en tres modos de transporte: fluvial, férreo y por carretera. Los modelos sirven para evaluar políticas de transporte en varios escenarios macroeconómicos. Un enfoque macroeconómico sobre dinámica de sistemas también es usado por Raux, Sdika, y Hermemier (2003) para analizar políticas en el mediano y corto plazo para el desplazamiento de personas en zonas urbanas bajo el concepto de movilidad sostenible. Por otra parte, Dou, Li y Gou (2014) diseñan un modelo basado en sistemas dinámicos para el desarrollo de políticas en el campo de la logística industrial que permite medir el desempeño de estrategias que promueven la economía regional y la eficiencia logística. Callejas-Cuervo, Valero-Bustos, y Alarcón-Aldana (2013) explican un modelo de transporte para ciudades intermedias en el que se evalúa la calidad del servicio, tomando como referencia la comodidad y la rapidez. Hang y Li (2010) desarrollan una metodología basada en dinámica de sistemas para la evaluación de regulaciones de carga en camiones. Goh y Love (2012) diseñan dos modelos para demostrar cómo la dinámica de sistemas puede facilitar y fomentar el análisis de políticas de seguridad vial. Feng, Chen, y Zhang (2013) explican un modelo de dinámica de sistemas utilizando la plataforma STELLA para modelar las tendencias de las emisiones de CO₂ y de consumo de energía para la Ciudad de Beijing durante 2005-2030. Serna, Arango y Gómez (2016) usan la dinámica de sistemas como soporte a la identificación y análisis de factores de desempeño de un corredor logístico, con el fin de formular criterios de evaluación que se ajusten al sistema logístico colombiano.

3. METODOLOGÍA

En la construcción del modelo de análisis bajo dinámica de sistemas, se seguirá la metodología explicada a continuación y que incluye los pasos presentados en la Figura 1.



Figura 1. Pasos para la modelación de sistemas dinámicos

Fuente: Elaboración propia

3.1 Definición del problema

El proceso de conceptualización busca establecer el objeto del estudio bajo una perspectiva general y un horizonte de tiempo. Entre las actividades de esta etapa se encuentran explorar y familiarizarse con el área de estudio, definir las principales preguntas que orientarán el trabajo investigativo y definir el horizonte temporal de interés (Luna-Reyes, 2003).

3.2 Conceptualización: Análisis de relaciones de causalidad

El siguiente paso en la modelación sistémica es la elaboración de diagramas causales que permiten según Sterman (2002) y Hjorth y Bagheri (2006), observar cómo las variables se comportan a lo largo del tiempo, modelar la realimentación del sistema en función de sus componentes como son: los flujos de información, la estructura, los retardos que pueden presentarse en el tiempo; y adicionalmente, contemplar las relaciones no lineales de los elementos estudiados.

3.3 Formulación: Elaboración de diagrama de flujos y niveles

El paso siguiente a la construcción de un diagrama causal, es llevar los elementos identificados que se interrelacionan a un diagrama de flujos y niveles (o diagrama Forrester), donde matemáticamente se explican las relaciones encontradas, y se incluyen parámetros que afectan individualmente cada elemento, permitiendo una comprensión gráfica completa del sistema. Este diseño preliminar se basa en una descripción matemática de las variables y relaciones del sistema dinámico. Estas descripciones pueden ser llamadas modelo matemático, y se describe en términos de ecuaciones diferenciales (Ogata, 1987). En la elaboración de los diagramas de flujos y niveles y la formulación del modelo dinámico, se usó la simbología definida por Forrester (1961), explicada a continuación (ver Figura 2).





| Representación | Descripción |
|---|-------------------|
|  | Variable de Nivel |
|  | Variable de Flujo |
|  | Variable Auxiliar |
|  | Parámetro |

Figura 2. Tipos de variables

Fuente: Forrester, 1961

Variables de nivel: Son representadas por un rectángulo. Son variables acumulativas cuya evolución en el horizonte temporal es de interés en el análisis del modelo. También son llamadas variables de estado y pueden ser interpretadas como magnitudes que acumulan resultados de decisiones o acciones pasadas y que pueden influir además, algunos comportamientos presentes y futuros.

Variables de flujo: Su representación gráfica tiene forma de ducto orientado de izquierda a derecha y en el centro se encuentra una válvula que regula el flujo desde la fuente (figura en forma de nube) hacia la variable de nivel, y que determina cómo éstas cambian de estado.

Variables auxiliares: Representadas en forma de círculo, constituyen variables que intervienen en el cálculo de las variables de flujo y las cuales pueden estar en función de otras variables en el sistema.

Parámetros: Representan variables que intervienen en el modelo, pero cuyos valores se determinan de forma exógena a éste. Por lo general permanecen fijos durante el periodo de simulación, pero también pueden ser la base para describir o analizar diferentes escenarios.

3.4 Análisis y evaluación del modelo

La simulación informática es el siguiente paso en la formulación del modelo dinámico. En esta etapa el modelo es desarrollado en un “software” de dinámica de sistemas que posibilite validar la consistencia de los resultados y evaluar las trayectorias de las variables de análisis. Entre los “softwares” disponibles en el mercado se encuentran: PowerSim, VenSim, Stella, i-think, entre otros. En esta etapa, el modelo es sometido a diferentes pruebas que recrean varios escenarios con los que se busca comprobar la consistencia lógica de las hipótesis definidas en la primera etapa de la metodología. Se hacen las comparaciones correspondientes entre los datos obtenidos del modelo y los que se tienen o esperan del mundo real. Se incluye además, análisis de sensibilidad que permiten determinar el comportamiento de algunas variables ante determinados cambios en los parámetros o condiciones de modelamiento.

4. DESARROLLO DEL MODELO DINÁMICO

Siguiendo el orden establecido en la metodología explicada anteriormente, a continuación, se desarrolla el modelo basado en dinámica de sistemas que permitirá analizar los principales factores vinculados al tiempo logístico asociado al transporte de carga en una vía terrestre.

4.1 Definición del problema. Análisis de los tiempos en el corredor logístico

El tiempo es uno de los factores importantes asociados al desempeño de los corredores logísticos, éste se vincula de manera directa a los costos de operación del vehículo y de manera indirecta a los costos asociados con los clientes y la percepción del servicio. Su análisis conduce a establecer estrategias que mejoren la operación logística del corredor. Sin

embargo, este análisis puede tener la dificultad de asociar en un mismo modelo todas las variables y aspectos que afectan el cálculo de los tiempos logísticos. Los modelos basados en sistemas dinámicos, como el desarrollado en este estudio, facilitan esta labor. Si bien no se pretende identificar todas las variables que afectan los tiempos en un corredor logístico, dado que existen particularidades de un corredor a otro, el estudio se centrará en factores generales y estratégicos como lo son la capacidad y los niveles de servicio de la vía.

El tiempo logístico o tiempo total de viaje, se define para este estudio como el tiempo entre el nodo origen y el nodo destino incluyendo operaciones de carga, descarga, consolidación y desconsolidación. De esta manera el tiempo total de viaje se presentará como una función de los tiempos que permanece el vehículo en los nodos origen o destino (tiempo en los nodos) y el tiempo de recorrido (tiempo entre nodos). La Figura 3 muestra una representación de las variables más importantes que componen estos tiempos.

Además de los tiempos de recorrido, los tiempos en los nodos, la calidad de la vía y la inversión sobre su mantenimiento inciden directamente en los costos de operación de los vehículos y la vida útil de estos, la capacidad de la vía en relación al diseño y los volúmenes actuales de tráfico dan origen al concepto de Nivel de Servicio de la Vía, el cual está relacionado de manera directa con la velocidad promedio de recorrido. Es así como el cálculo de la capacidad y los niveles de servicio son fundamentales para la toma de decisiones en la planeación de transporte e infraestructura.

Capacidad: la capacidad de una vía es el número máximo de vehículos que pueden pasar por una sección uniforme de una calzada durante un intervalo de tiempo bajo condiciones prevalecientes.

Nivel de servicio: Describe las condiciones de operación del flujo como la velocidad y el tiempo promedio de recorrido, la libertad de maniobrar, seguridad vial, comodidad. En el Highway Capacity Manual (2000) se establecen seis niveles de servicio denominados: A, B, C, D, E y F que van del mejor al peor, y se definen dependiendo de las condiciones de operación, si son de circulación continua o discontinua.

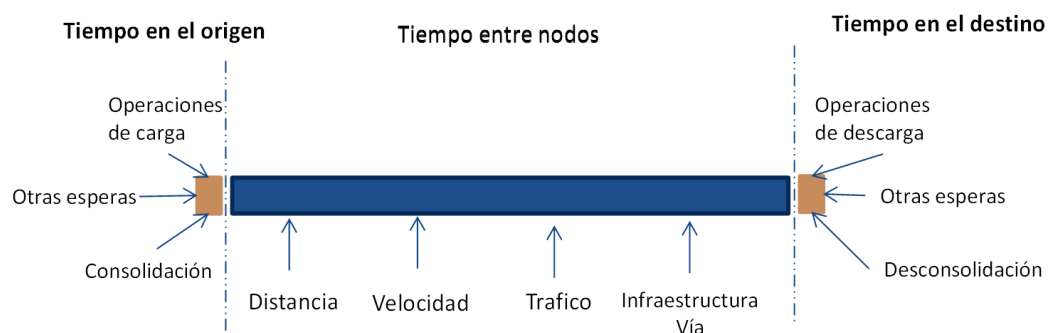


Figura 3. Tiempos logísticos

Fuente: Elaboración propia

4.2 Conceptualización: análisis de relaciones de causalidad

La metodología seguida para la elaboración de un modelo basado en dinámica de sistemas continúa con la elaboración de un diagrama causal que permita identificar no sólo las principales variables y factores que intervienen en el modelo, sino también las relaciones que se dan entre éstos. En la Figura 4 se presenta el diagrama causal que es la base para el desarrollo del modelo sistémico. En cada una de las relaciones mostradas entre las variables de la figura, se define la polaridad o efecto, positiva o negativa, que tiene una variable sobre otra. Cuando el efecto de una variable sobre otra es positivo, como por ejemplo viajes realizados sobre volumen de tránsito hora pico, un crecimiento de la primera conlleva un crecimiento de la segunda; si la polaridad es negativa se presenta el efecto contrario, como sucede con el volumen de tránsito hora pico y el nivel de servicio. De estas relaciones positivas y negativas, surgen ciclos o bucles los cuales, según la teoría en dinámica de sistemas, permiten balancear o reforzar comportamientos dinámicos en los cuales se soporta el análisis de los resultados.

Dos bucles de realimentación pueden ser identificados en el diagrama causal. El bucle más importante relaciona, entre otras variables: los viajes ofertados, el volumen de tráfico, el nivel de servicio, la velocidad promedio y el tiempo de viaje. Si la demanda aumenta, este bucle tendría un efecto regulador que no permitiría un incremento desmedido en los viajes realizados, que está regulado por los tiempos de viaje, supeditados a su vez, por los niveles de servicio que se disminuirían por el incremento de la actividad logística (viajes realizados).

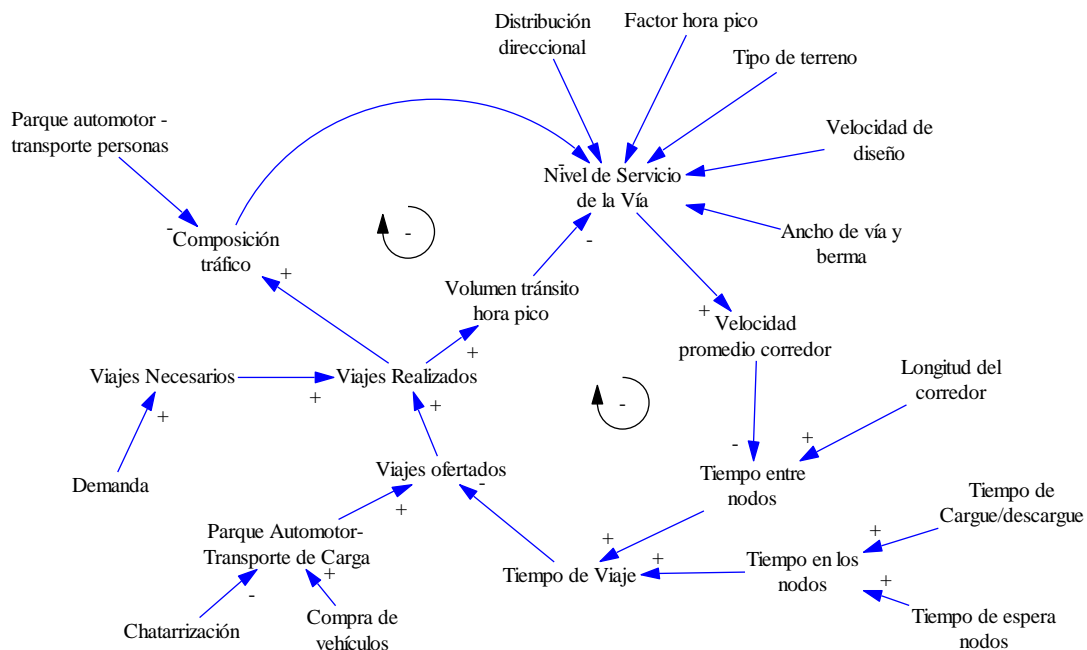












Figura 4. Diagrama causal con bucles de realimentación










Fuente. Elaboración propia











4.3 Formulación: Elaboración de diagrama de flujos y niveles

A partir del diagrama causal presentado en la sección anterior, es posible definir las principales variables del modelo y que se clasificaran siguiendo la tipología establecida en la Figura 2. Las variables que se tendrán en cuenta para la descripción del modelo dinámico se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Variables de tiempos

| Tipo de variable | Nombre | Unidades | Descripción |
|---|---|--------------------|---|
|  | Camiones chatarrizados | Camiones/año | Número de camiones que salen del parque automotor de acuerdo a la edad de chatarrización. |
|  | Carga transportada promedio/viaje | Ton/viaje | Cantidad promedio transportada (toneladas) por viaje. |
|  | Capacidad camión | Ton/Camión | Cantidad de carga (toneladas) que pueden ser transportadas según el tipo de camión: C2, C3, CS. |
|  | Compra anual de camiones | Camiones/año | Cantidad de camiones comprados en un año. Esta variable se desagrega por tipo de camión |
|  | Demanda anual | Ton/año | Demanda agregada por año, de los productos que necesitan ser transportados |
|  | Factor de carga | % | Porcentaje de ocupación del vehículo. Es la relación entre lo que transporta en toneladas y su capacidad. |
|  | Parque Automotor-Trans. de carga | Número de Camiones | Tamaño del parque automotor según tipo de camión (C2, C3, CS) |
|  | Tasa de compra Trans. de carga | Camiones/año | Variación de la cantidad de camiones que se compra año tras año. |
|  | Tasa de crecimiento anual de la demanda | % | Cambio porcentual de la cantidad demandada (tonelada) por corredor por año. |
|  | Toneladas transportadas año | Ton/año | Cantidad total movilizada (tonelada) por el corredor en un año |

| | | | |
|---|-------------------------------|----------------------------------|---|
|  | Viajes demandados | Viajes/año | Cantidad de viajes demandados por cada corredor en un año. |
|  | Viajes ofertados | Viajes/año | Número de viajes o recorridos que puede efectuar el vehículo en un año por el corredor. Corresponde a la disponibilidad de viajes bajo las condiciones de tiempo de viaje y horas disponibles. |
|  | Viajes realizados | Viajes/año | Sumatoria del número de viajes realizados por cada corredor según el tipo de camión |
|  | Altimetría por tramos | % de km plano-ondulado-montañoso | Factor en el que se reduce o incrementa la velocidad debido a las pendientes positivas o negativas de la vía en tramos homogéneos |
|  | Distancia recorrida por viaje | Km/viaje | Distancia que recorre el vehículo desde su punto de origen hasta el punto final. |
|  | Tiempo de carga | Horas | Sumatoria del tiempo de espera para cargar y el tiempo de carga de la mercancía en los nodos. Es el tiempo transcurrido desde que el vehículo se anuncia a la llegada de las instalaciones del remitente hasta que finalmente sale cargado del lugar. |
|  | Tiempo de descarga | Horas | Sumatoria del tiempo de espera para descargar y el tiempo de descarga de la mercancía en los nodos. |
|  | Tiempo en los nodos | Horas | Horas que tarda un vehículo desde que llega al punto de descarga hasta que sale del mismo. Depende del tiempo de carga y descarga de la mercancía. |
|  | Tiempo entre nodos | Horas | Horas que tarda el vehículo desde que sale del punto de origen hasta el punto final sin incluir el tiempo que invierte en descargar la mercancía en los nodos. Depende de la distancia entre los nodos, la velocidad promedio y el tiempo de atención de accidentes y desastres |

| | | | |
|---|---|-------------|---|
|  | Tiempo no operacional | Horas | Tiempo que debe esperar el transportador para cargar o descargar la mercancía |
|  | Tiempo total de recorrido | Horas/viaje | Horas que tarda un vehículo en llegar desde su punto de origen hasta el punto final |
|  | Velocidad de diseño | Km/h | Máxima velocidad que en condiciones de seguridad, puede ser mantenida en una determinada sección de una carretera. |
|  | Velocidad promedio | Km/h | Está en función del nivel de servicio que ofrece cada tramo de los corredores. |
|  | VHP | | Cantidad de vehículos que transita en horas pico |
|  | FHV: Factor de ajuste por tipo de vehículo | | Factor ajuste de los camiones para los niveles A-E. Depende del nivel de servicio que presta la carretera. |
|  | FD: Factor de ajuste direccional | | Factor de separación direccional obtenido como proporción de vehículos de ida respecto a la cantidad de vehículos de vuelta. |
|  | FW: Factor de ajuste por ancho de carril y hombros | | Calculado a partir de la relación entre el nivel de servicio, el ancho de carril y los hombros (acotamiento) de la carretera de cada corredor. |
|  | V-C: Factor de relación V/C para carreteras de dos carriles | | Relaciona el nivel de servicio con el tipo de terreno y las restricciones de paso propias de cada corredor. |
|  | Restricciones de paso | % | Porcentaje de restricciones de paso en un corredor, las cuales prohíben o limitan el acceso de los vehículos que se las encuentran de frente en el sentido de su marcha y a partir del lugar en que están situadas. |

Fuente: Elaboración Propia

4.3.1 Modelo Sistémico para el análisis de tiempos logísticos

Partiendo de la base de análisis establecida en el diagrama causal y la clasificación dada a las variables que intervienen en el modelo, se elabora el diagrama de flujos y niveles, el cual

constituye junto con las relaciones matemáticas entre las variables, el modelo de análisis para los tiempos logísticos basado en dinámica de sistemas (ver Figura 5).

En este modelo sobresalen dos variables de nivel: la demanda y el parque automotor, las cuales representan la demanda y la oferta (de capacidad), respectivamente. En este caso, los niveles de demanda obedecen a factores exógenos al sistema analizado, al igual que el parque automotor el cual está en función de políticas y decisiones tomadas de forma estratégica por las autoridades correspondientes en el caso de la chatarrización y a dinámicas industriales y económicas no contempladas en el modelo que afectan la tasa de compra anual de camiones.

A continuación se explican algunos componentes del modelo que facilitarán su interpretación.

4.3.1.1 Modelación del parque automotor

El tamaño del parque automotor es una de las variables que más interés despierta en todos los actores del sistema de transporte. Las políticas de chatarrización, competencia y política de precios dependen en gran parte de cuántos camiones hay y cuántos se necesitan. En la Figura 6 se presenta un diagrama de Forrester que modela las relaciones entre la compra de camiones, el tamaño del parque automotor y su chatarrización. En muchas ocasiones solo un porcentaje de los vehículos que cumplen con la edad de chatarrización son chatarrizados, en la Figura 6 este porcentaje es llamado cumplimiento de política de chatarrización.

Parque automotor(t)

$$\begin{aligned}
 &= \text{Parque automotor}(t - 1) + \text{Compra camiones}(t) \\
 &- (\text{Camiones mayores 25 años}(t)) \\
 &* \text{tasa (política) de chatarrización} \\
 &* \text{Cumplimiento de política.}
 \end{aligned} \tag{1}$$

En relación al parque automotor, no sólo es importante el número de vehículos sino también la capacidad de éstos, la cual puede estar entre las 8 toneladas para los camiones más pequeños C2 y las 40 toneladas con camiones de cuatro o cinco ejes.

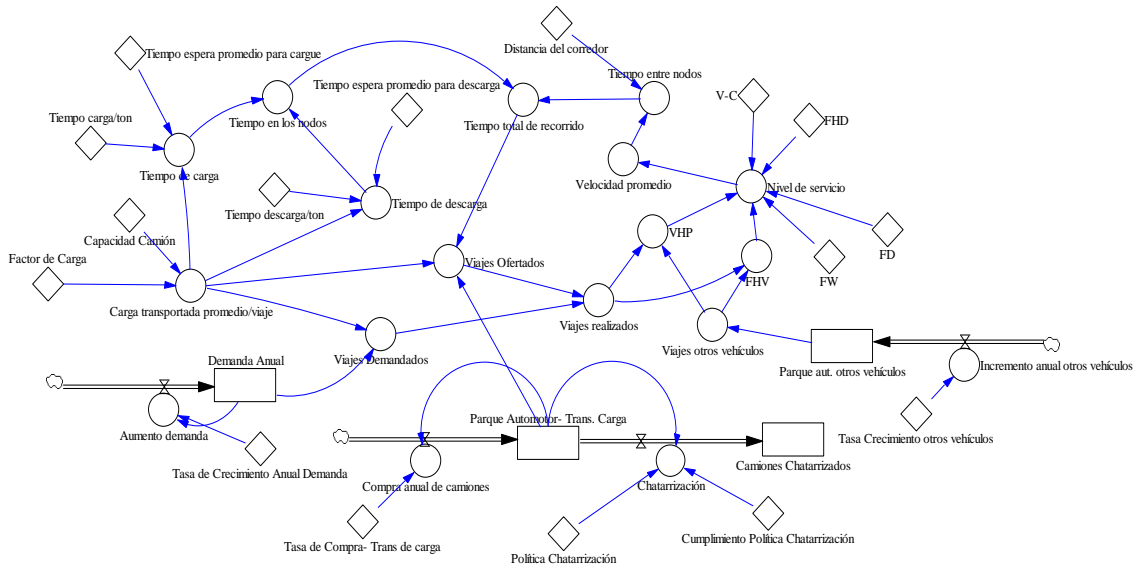


Figura 5. Diagrama de flujos

Fuente: Elaboración propia

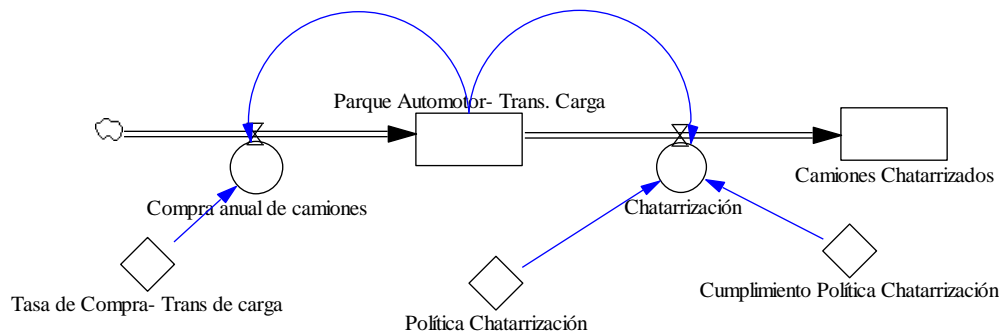


Figura 6. Representación sistémica del parque automotor

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.2 Modelación del número de viajes

Una de las variables identificadas que más afecta el sistema dinámico es el número de viajes. Además de los cuatro factores de desempeño en un corredor, el número de viajes siempre será una variable a ser tomada en cuenta cuando se busquen establecer políticas que mejoren el desempeño logístico, dada la relación directa entre costos, rentabilidad y demanda, a lo cual también tendría que agregarse el nivel de servicio de la vía. Como se muestra en la Figura 7, el número de viajes es uno de los factores que más incide en el desempeño del sistema logístico. Su cálculo está dado por la demanda, el parque automotor, factor de carga, tiempo de recorrido. Un análisis del número de viajes permitirá conocer si la oferta de viajes (capacidad de transporte) se ajusta a los viajes demandados; una diferencia entre la oferta y la demanda está acompañada de un incremento en los costos bien sea por sobrecapacidad (costos fijos) o por un bajo nivel de servicio debido a la no satisfacción en su totalidad de los viajes demandados.

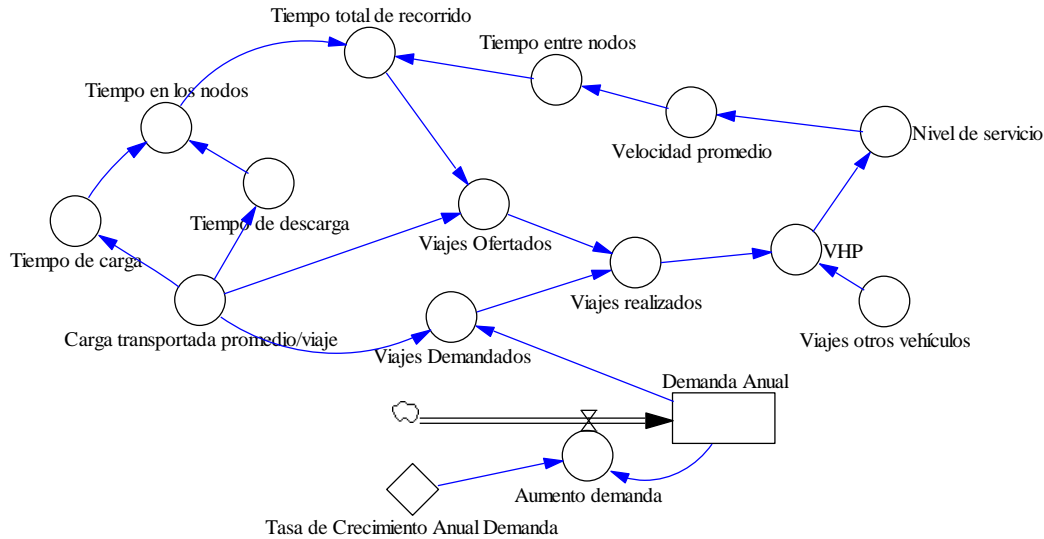


Figura 7. Representación sistémica del número de viajes

Fuente: Elaboración propia

A continuación se muestran las ecuaciones usadas en el cálculo del número de viajes:

$$\text{Viajes demandados} = \frac{\sum \text{Demanda anual corredor}}{(\text{Capacidad promedio por camión}) * \text{factor de carga}} \quad (2)$$

$$\text{Carga transportada prom/viaje} = \frac{\text{Número de camiones}}{\text{Total camiones}} * \text{capacidad} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{Viajes ofertados} &= \frac{\text{Días hábiles}}{\text{Tiempo de recorrido}} \\ &* \text{Parque Automo. Trans. Carga} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\text{Viajes Realizados} = \text{Min}(\text{Viajes Demandados}, \text{Viajes Ofertados}) \quad (5)$$

4.3.2 Modelación de los niveles de servicio de la vía

A continuación se describe el procedimiento seguido para calcular la capacidad y niveles de servicio y que está basado en el National Research Council (2000).

Paso 1. Determinar características geométricas de la carretera e información del tráfico.

Como son:

Volumen de tránsito hora pico (*Vhp*): Según último aforo vehicular

Factor de pico horario (*Fph*): estimado de la tabla de Highway Capacity Manual. National Research Council (2000).

Composición del tráfico (vehículos, pesados, livianos, etc.)

Distribución direccional del tráfico

Tipo de terreno (montañoso, ondulado, plano).

Velocidad de diseño

Ancho de vía

Paso 2. Convertir el volumen de tránsito hora pico (V_{ph}) en flujo equivalente a través de la formula siguiente:

$$V = V_{ph}/f_{ph}. \quad (6)$$

Paso 3. Determinación del flujo de servicio de la vía para el nivel de servicio i :

$$V_{fi} = 2800 * (v/c) * f_d * f_w * f_{hv} \quad (7)$$

Donde:

2800: capacidad en condiciones ideales en ambas direcciones

v/c : máxima relación Volumen/capacidad asociada al nivel de servicio i . Dicha relación está en función de las restricciones de rebase

f_d : factor de distribución direccional

f_w : factor de ancho de carril y berma

f_{hv} : factor de ajuste por vehículos pesados para cada nivel de servicio que se define con la siguiente ecuación:

$$f_{hv} = 1/[1 + PT(ET-1) + PR(ER-1) + PB(EB-1)] \quad (8)$$

PT , PB , PR : Porcentaje de camiones, buses y otros vehículos respectivamente.

ET , ER , EB : Número equivalente de camiones, buses y otros vehículos para autos particulares respectivamente.

Una vez calculado los V_{fi} para cada nivel de servicio, se comparan con el volumen de tránsito ajustado al flujo equivalente y se determina el nivel de servicio con el que opera la vía. Los niveles de servicio establecidos por el National Research Council (2000) son seis: A , B , C , D , E y F , que van desde el que ofrece la mayor velocidad de operación al de menor velocidad, ver Tabla 2.

Tabla 2. Velocidad según nivel de servicio

| Nivel de servicio | Velocidad máx. de operación (km/h) |
|-------------------|------------------------------------|
| A | 90 |
| B | 80 |
| C | 70 |
| D | 60 |
| E | 55 |
| F | -- |

Fuente: National Research Council, 2000

5. APLICACIÓN DEL MODELO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El modelo es usado para el análisis de niveles de servicio de la vía Medellín-Buenaventura, que hace parte de la Troncal de Occidente. Esta es uno de los corredores terrestres más importantes del país ya que es la principal vía de acceso al Sur del país y recorre 10 Departamentos (E-Transcol, 2014). En la Figura 8 se muestra una parte del mapa de Colombia y se señala el corredor elegido.

En su recorrido la autopista Medellín- Buenaventura presenta características diferentes en términos de infraestructura, geografía y demanda, por lo que la capacidad y los niveles de servicio son cambiantes. Para un manejo adecuado de estas diferencias, se divide la vía en tramos a partir de las condiciones de altimetría, esto permitirá obtener resultados de consumo de combustible más precisos, además el nivel de servicio vial se afecta directamente por esta variable. En la Tabla 3 se muestran los tramos en los que se ha dividido la vía y el valor de las variables necesarias para el cálculo de los niveles de servicio. Los valores de la demanda, el parque automotor, entre otras variables son tomados de la Encuesta Origen Destino del Transporte de Carga 2013 desarrollada por el Ministerio de Transporte (Ministerio de Transporte, 2013), además de informes disponibles en el Instituto Nacional de Vías (Invías) y en el Ministerio, sobre la caracterización y estado de la infraestructura vial y la capacidad de transporte de mercancía.

El modelo es ejecutado para un horizonte de simulación de 15 años, para el cual se proyectó un crecimiento de la demanda y del parque automotor del 3% y 2% respectivamente. El factor de carga promedio se fijó en 60%, la edad de chatarrización en 25 años y el cumplimiento de la política de chatarrización en un 20%. Los volúmenes de tráfico para cada nivel de servicio obtenidos para el último periodo de simulación y el valor del volumen de demanda máxima (vph) son resumidos en la Tabla 4.

En este escenario, los Vph para cada tramo de la vía Medellín-Buenaventura se aumentan a casi el doble, lo que afecta la velocidad máxima a la que se puede transitar según el manual HCM. En la última columna de la Tabla 4 se hace una interpolación con respecto a los Vfi para encontrar una velocidad máxima ajustada al Vph . El comportamiento dinámico de esta velocidad en el horizonte de tiempo de simulación se muestra en la Figura 9.



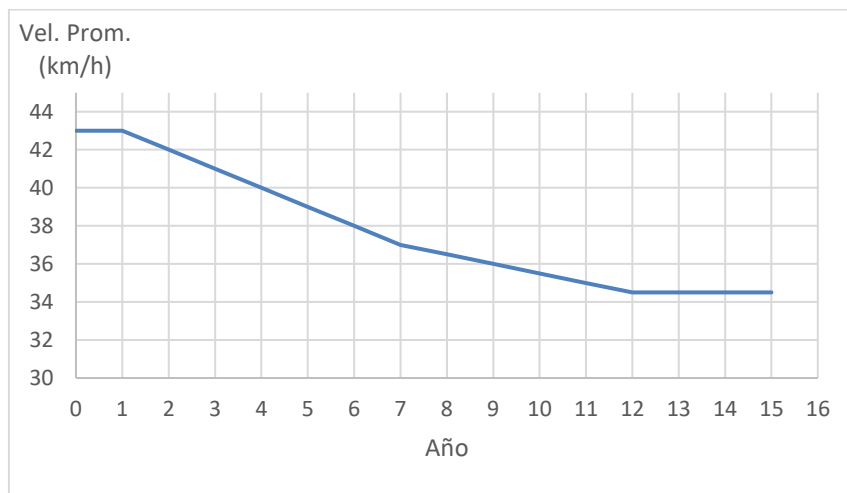
Figura 8. Corredor Logístico Medellín - Buenaventura

Tabla 3. Caracterización del Corredor Medellín Buenaventura

| Tramo | km | Factor (v/c) | | Factor FD | Factor FW | | Factor Fhv (%) | | | Vph Inicial |
|---------------------|-----|--------------|---------------|-----------|-----------|--------|----------------|-------|--------------|-------------|
| | | Terreno | Rest. de paso | | Berma | Carril | Camiones | Buses | Particulares | |
| Medellín-La Pintada | 78 | M | 60% | 50/50 | 1.8 | 3.65 | 24 | 19 | 58 | 732 |
| La Pintada – Irra | 64 | O | 50% | 50/50 | 1.8 | 3.65 | 51 | 8 | 42 | 277 |
| Irra-Pereira | 75 | M | 20% | 50/50 | 1.8 | 3.65 | 38 | 9 | 52 | 649 |
| Pereira- La Paila | 83 | P | 40% | 50/50 | 1.8 | 3.35 | 6 | 12 | 82 | 450 |
| La Paila- Buga | 16 | O | 60% | 50/50 | 1.8 | 3.65 | 48 | 12 | 40 | 919 |
| Buga- Buenaventura | 161 | P | 40% | 50/50 | 1.8 | 3.35 | 67 | 6 | 27 | 430 |

Tabla 4. Información de salida para el análisis de los niveles de servicio

| TRAMO | Flujo de servicio de la vía V_f | | | | | Vph Final | NS | Velocidad | |
|----------------------|-----------------------------------|-----|-----|-------|-------|-----------|----|-----------|-------------|
| | A | B | C | D | E | | | Máxima | Interpolac. |
| Medellín- La Pintada | 67 | 199 | 374 | 584 | 1.107 | 1,455 | E | 40.0 | 25.00 |
| La Pintada – Irra | 157 | 227 | 367 | 548 | 856 | 551 | E | 40.0 | 39.88 |
| Irra-Pereira | 120 | 234 | 396 | 589 | 971 | 1,290 | E | 40.0 | 25.00 |
| Pereira- La Paila | 202 | 457 | 783 | 1.377 | 2.319 | 896 | D | 60.0 | 56.21 |
| La Paila- Buga | 52 | 148 | 279 | 427 | 809 | 1,827 | E | 40.0 | 25.00 |
| Buga- Buenaventura | 58 | 129 | 237 | 356 | 654 | 855 | E | 40.0 | 25.00 |

**Figura 9. Velocidad promedio en el corredor Medellín- Buenaventura**

Fuente: Elaboración propia

Según la figura 9, un aumento en la demanda y del parque automotor incide sobre los niveles de servicio y por ende sobre la velocidad en la vía, restándole competitividad. Esta relación no es tan directa como podría pensarse, es necesario primero evaluar la eficiencia con la que se transporta la carga. Es decir, un aumento en la demanda no necesariamente lleva a un aumento del número de viajes, dado que se puede mejorar el factor de carga y promover el reemplazo de camiones de menor carga por otros de mayor capacidad.

6. CONCLUSIONES

El modelo aquí presentado constituye una forma diferente de evaluar los niveles de servicio en la vía, al lograr integrar de una manera sistémica diferentes variables que inciden en el desempeño logístico y por ende en la capacidad y los niveles de servicio. El modelo facilita

la comprensión y análisis para el establecimiento de políticas relacionadas con la chatarrización de vehículos, eficiencia en el transporte con respecto al factor de carga y uso de vehículos de mayor capacidad.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación - COLCIENCIAS y al Ministerio de Transporte por apoyar la investigación que ha dado origen a este artículo a través de la Convocatoria 603 de 2012. El proyecto del cual ha surgido este artículo como resultado de investigación, lleva por título “Estudio del sistema logístico de carga en los principales corredores de Colombia - E-TRANSCOL”, identificado con el código 111860337707 de Colciencias.

REFERENCIAS

- CALLEJAS-CUERVO, M., VALERO-BUSTOS, H. A., Y ALARCÓN-ALDANA, A. C. (2013). *Simulation based on system dynamics for evaluating the quality of transport service in a complex social system*. Dyna Nro. 180, 33-40.
- DOU, S., LI, X. Y GOU, J. (2014). *Study on Logistics Industry Development Policy of Beijing Based on System Dynamic*. Journal of Industrial Engineering and Management, 7(2), 573-587.
- E-TRANSCOL. (2014). *Documento No 4- Selección de un Corredor Logístico Característico del Sistema Logístico Nacional*. Medellín.
- FEDESARROLLO. (2013). *Indicadores del sector transporte en Colombia*. Santa Fé de Bogotá.
- FENG, Y., CHEN, S. Y ZHANG, L. (2013). *System dynamics modeling for urban energy consumption and CO2 emissions: A case study of Beijing, China*. Ecological Modelling, 252, 44– 52.
- FORRESTER, J. W. (1961). *Industrial Dynamics*. Portland: Productivity Press.
- GOH, Y. M. Y LOVE, P. E. (2012). *Methodological application of system dynamics for evaluating traffic safety policy*. Safety Science 50, 1594–1605.
- HANG, W. Y LI, X. (2010). *Application of system dynamics for evaluating truck weight regulations*. Transport Policy, 17, 240-250.
- HJORTH, P., Y BAGHERI, A. (2006). *Navigating towards sustainable development: A system dynamics approach*. Futures, 38(1), 74–92.
- KARSKY, M. Y SALINI, P. (2003). *Simtrans: A simulation tool for sustainable freight transport policies*. European Journal of Economic and Social Systems, 229-250.
- LUNA-REYES, L. F. (2003). *Model Conceptualization: a Critical Review*. Proceedings of the 21st International Conference of the System Dynamics Society(518), 1-11.
- MINISTERIO DE TRANSPORTE. (2013). *Encuesta Origen Destino del Transporte de Carga 2013*. Santa Fé de Bogotá.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL. (2000). *Highway Capacity Manual*. Washington.

- OGATA, K. (1987). *Dinámica de sistemas*. Naucalpan de Juárez: Prentice- Hall.
- RAUX, C., SDIKA, M. Y HERMEMIER, V. (2003). *Simulation de la dynamique du système de déplacements urbains : une plate-forme de modélisation*. Rapport de recherche.
- SALINI, P. Y KARSKY, M. (2015). *SIMTRANS (Freight Transportation Simulation Model)*. Obtenido de <http://patrice.salini.free.fr/Simtrans%20Palerme%28txt%29.pdf>
- SERNA, C. A., ARAGO-SERNA, M. D. Y GÓMEZ, J. A. (2016). *Dinámica de sistemas para la evaluación de corredores logísticos*. Medellín: Editorial Bonaventuriana.
- STERMAN, J. (2002). *System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology Engineering Systems Division.

28 Generación de un índice en transporte urbano de carga en ciudades mexicanas: Desafíos metodológicos para una investigación nacional

Eduardo Betanzo Quezada

Universidad Autónoma de Querétaro, México

Miguel Ángel Toral Luna

Centro Queretano de Recursos Naturales, México

José A. Romero Navarrete

Dr. Saúl A. Obregón Biosca

Universidad Autónoma de Querétaro, México

RESUMEN

Este artículo se enfoca al estudio del transporte urbano de carga en ciudades medias mexicanas. La justificación para conocer la problemática que enfrenta esta modalidad de transporte e intervenir de manera integral en su organización, se fundamenta en las preocupaciones por los efectos nocivos que genera al medio ambiente y en el interés en promover sus efectos positivos en coadyuvancia con la actividad económica local. En ese sentido, el objetivo es explicar la metodología empleada en una investigación de carácter nacional, cuya finalidad última es la generación de un índice de desempeño del transporte urbano de carga en apoyo al diseño de políticas energéticas y de desarrollo sustentable, incluyendo las relacionadas con el desarrollo de infraestructura de transporte. Con respecto a la metodología, se expone el planteamiento de distintas áreas de trabajo, por ejemplo, los criterios para la selección de zonas metropolitanas de interés, junto con una serie de determinantes del transporte urbano de carga que se presentan con estadísticas agregadas. También se explica la herramienta diseñada para generar el índice deseado y realizar análisis comparativos en la siguiente etapa de la investigación.

Palabras clave: Ingeniería de Transporte, transporte urbano de carga, congestionamiento, calidad del aire, cambio climático, políticas de transporte

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

En la práctica de la planeación urbana, los beneficios que se pueden derivar de un transporte de carga bien organizado no han sido suficientemente valorizados, y la población percibe a los vehículos de carga como algo perjudicial para el medio ambiente y que contribuye a empeorar los problemas de congestión, contaminación, seguridad y ruido (Allen et al., 2007).

La falta de entendimiento sobre la naturaleza de esta modalidad de transporte y la falta de información apropiada para intervenir en el sentido de mitigar sus efectos nocivos y potenciar sus beneficios a la sociedad, contribuyen a la inacción o a intervenciones erráticas por parte de las agencias responsables en distintos niveles de gobierno.

En el contexto de los problemas ambientales que enfrenta México, desde el año 2006 los estudios de vulnerabilidad ante el cambio climático lo señalan como un país vulnerable como consecuencia de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a la atmósfera (INE-SEMARNAT, 2006). Dentro de ese fenómeno, una de las actividades que más contribuye al cambio climático no sólo en México sino también en el mundo industrializado, es el transporte en sus distintas modalidades. Su participación en este fenómeno es crucial, toda vez que mientras que la emisión de gases de efecto invernadero decreció en 15% en sectores de la economía que funcionan como fuentes fijas, las generadas por el transporte a través de sus fuentes móviles se incrementaron en 36%, según la *Organisation for Data Exchange by Tele-Transmission in Europe* (ODETTE por sus siglas en inglés) (ODETTE, 2013).

En el caso de México, la Estrategia Nacional de Cambio Climático (GM, 2013a) establece dentro de sus ejes y líneas de acción, el transitar a modelos de ciudades sustentables con respecto a sus sistemas de movilidad. A este respecto, establece de manera explícita el promover la evolución hacia sistemas de transporte público de personas, la generación de redes multimodales eficientes como parte de una política integral de desarrollo urbano y movilidad que reduzca los tiempos y distancias de viaje. Sin embargo, el transporte urbano de carga pasa desapercibido dentro de esa estrategia nacional a pesar de su importancia.

Por ello se propuso la investigación denominada “Generación de indicadores de desempeño del transporte urbano de carga en apoyo al diseño de políticas energéticas y de desarrollo sustentable”, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, a través de la Convocatoria Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales, 2013. El proyecto se realiza de manera conjunta entre un grupo de investigadores de la Universidad Autónoma de Querétaro y del Centro Queretano de Recursos Naturales, constituyendo la sexta etapa de una serie de investigaciones que se han realizado en la Zona Metropolitana de Querétaro, pero ahora con una perspectiva nacional, dadas las características del financiamiento recibido.

El enfoque adoptado sobre el desempeño del transporte urbano de carga se alinea a la definición de *desempeño ambiental* (basada en la definición de la ISO 14001 sobre un sistema de gestión ambiental), el cual resulta de las acciones realizadas en una ciudad para proteger y fomentar el cuidado del medio ambiente y prevenir, reducir o mitigar el impacto adverso que los asentamientos humanos, las actividades productivas y los servicios ejercen sobre éste, tomando como referencia las políticas, las regulaciones, los objetivos y las metas ambientales de la ciudad (GM, 2013b).

1.2 Planteamiento del problema

En México se carece de diagnósticos sobre transporte urbano de carga que permitan a las autoridades detectar las necesidades inherentes, por ejemplo, en el tema de la infraestructura vial o de la reglamentación, y con ello tener un punto de partida para intervenir de manera acertada dentro de las ciudades. La dificultad para comprender las implicaciones que acarrea esta actividad, la falta de información de carácter específico y el desconocimiento de las características de esta modalidad de transportación, hacen compleja la definición de estrategias de intervención desde una perspectiva integral en procesos de planeación urbana y de desarrollo económico sustentable.

En el caso de México, producto de su dinámica económica y social y de la expansión acelerada de muchas de sus ciudades y al ser el transporte urbano de carga una de las modalidades menos estudiadas y atendidas, es previsible que contribuya a agudizar los impactos derivados de la emisión de GEI, y de otros como el ruido, congestión vial, uso del suelo y emisión de agentes contaminantes.

Esta preocupación se manifiesta de manera contundente al reportarse que en algunos países el 80% de los viajes de carga en ciudades se realiza por vehículos comerciales y de reparto (Holgún-Veras et al., 2015).

Desde el año 2005 se han identificado las tendencias de crecimiento poblacional y de expansión urbana en las 56 principales zonas metropolitanas del país (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2007). Según datos de la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL, 2010), la población en zonas urbanas ha crecido en promedio nacional 2.60 veces, mientras que la extensión de las manchas urbanas ha sido de 11 veces. Por ejemplo, el Valle de México aumentó 1.42 veces su población en 30 años, mientras que la superficie creció 3.57 veces; la zona metropolitana de Toluca aumentó 3.25 veces, y la superficie de su territorio 26.28 veces; en Cabo San Lucas la población creció 2.66 veces pero el territorio lo hizo 76.38 veces.

Si las tasas de urbanización se asocian también a la actividad económica local, la dinámica económica y social de las ciudades se ve reflejada en el número de camiones de carga en circulación. Las proyecciones estadísticas sobre la relación entre crecimiento de la población y de las manchas urbanas, la expansión de los sectores comercial, y del parque vehicular de carga parecen irreversibles en el corto y mediano plazos, y tenderán a agudizar los impactos de los camiones de carga si no se interviene adecuadamente para mitigar sus manifestaciones negativas y aprovechar sus beneficios en aras de la competitividad local.

Si bien un cúmulo de datos estadísticos permitiría mostrar el proceso de crecimiento de la población y de concentración-expansión urbana, detrás del fenómeno poblacional se encuentran subyacentes muchos fenómenos de logística y transporte urbano de carga al crearse nuevas condiciones de demanda de bienes de consumo, por lo cual el impacto de

estas nuevas condiciones debe ser previsto en México. Independientemente de las acciones e innovaciones tecnológicas que adopte el sector privado (con o sin apoyo gubernamental) para mejorar su logística a nivel urbano bajo un contexto puramente empresarial y de rentabilidad, el gobierno, en sus diferentes niveles, federal, estatal y municipal tiene una responsabilidad en la conducción de políticas públicas. En este sentido, la organización ODETTE insiste en que las acciones para reducir las emisiones de GEI por medio de un transporte de carga más eficiente, algunas de ellas incentivadas por los poderes públicos, traen consigo efectos positivos al reducir simultáneamente otros impactos ambientales (ODETTE, 2013)

La dificultad para entender esta problemática radica en que las iniciativas que atañen al transporte urbano de carga van más allá de la simple gestión del tráfico o de la aplicación de medidas restrictivas a la circulación de camiones pesados y comerciales, pues se ubican en el contexto de la movilidad urbana, al tener fuertes implicaciones sobre el desarrollo urbano y el ordenamiento territorial. En el mismo sentido aparecen los temas de medio ambiente y sustentabilidad, pero también los relativos a las capacidades institucionales de las administraciones públicas locales y de la legislación, y sin duda los de competitividad y productividad de las empresas, sin olvidar el fin último que es mejorar la calidad de vida de la población.

Debido a que el transporte de bienes pasa generalmente inadvertido en la planeación de las ciudades, particularmente de las mexicanas, en contraste con la atención institucional y el apoyo financiero que recibe el transporte público y privado de personas, parece necesario sentar las bases de una estrategia nacional en transporte urbano de carga, para contribuir al desarrollo sustentable de las ciudades, reducir el dispendio energético e incrementar la productividad de las empresas privadas.

Se parte del supuesto que la generación de indicadores sobre el transporte urbano de carga puede constituir una herramienta útil para identificar las condiciones en las que se desarrolla esta actividad, con el propósito de proponer políticas públicas que contribuyan al objetivo de transitar hacia modelos de ciudades sustentables y competitivas.

1.3 Objetivo

El objetivo de este artículo es explicar la metodología empleada y el análisis de determinantes estadísticos, como parte de una investigación de carácter nacional, cuya finalidad última es la generación de indicadores de desempeño del transporte urbano de carga en ciudades medias mexicanas, en apoyo al diseño de políticas energéticas y de desarrollo sustentable. Conceptualmente, esta investigación rebasa los enfoques de la Ingeniería de Transporte al plantear sus alcances desde una perspectiva sustentada en la capacidad de los poderes públicos a nivel nacional, estatal y municipal para inducir cambios en un sistema complejo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Diseño metodológico

Para llevar a cabo las dos etapas de la investigación, se han planteado 8 grandes áreas de trabajo, como se ilustra en la Figura 1.

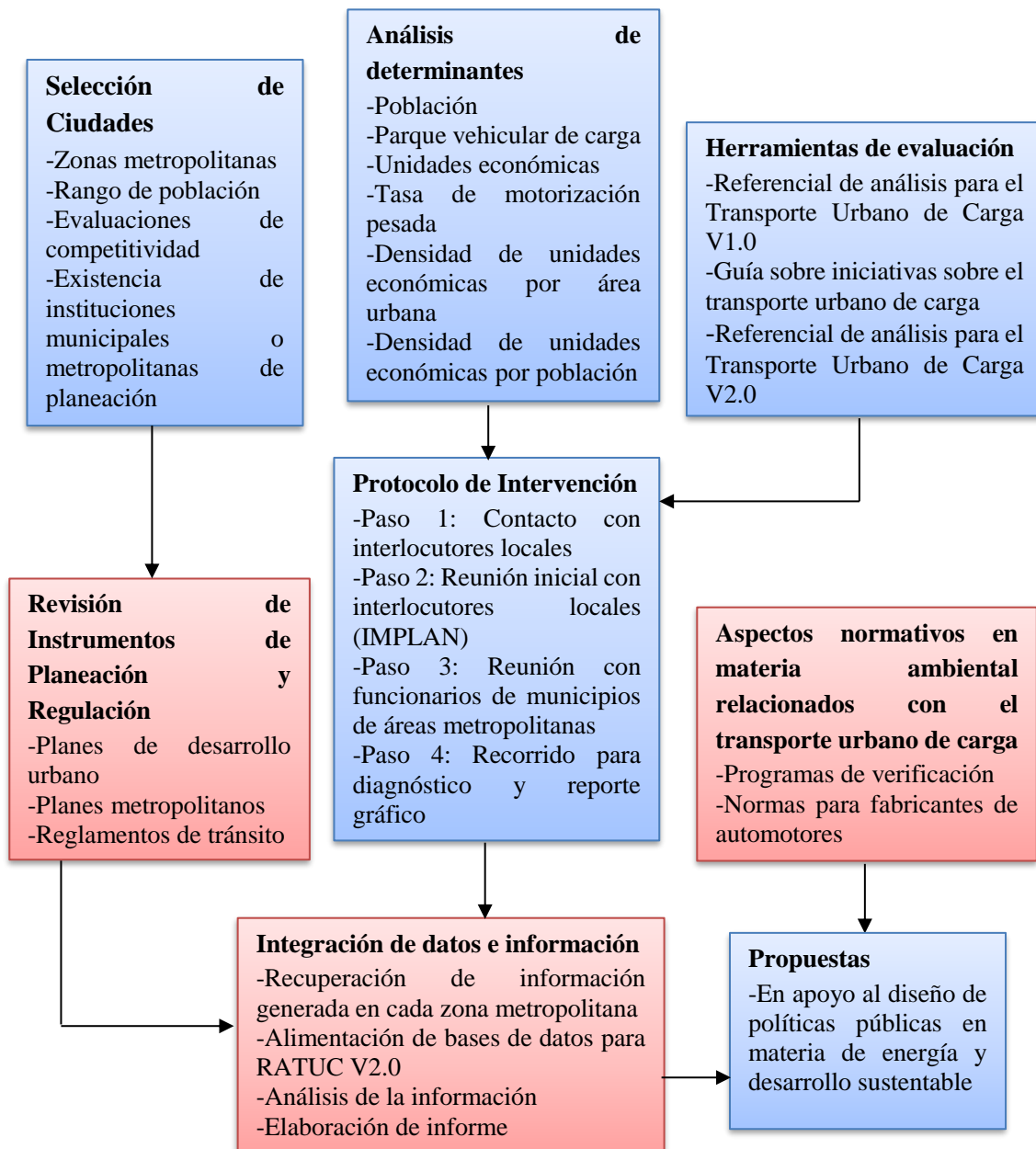


Figura 1. Áreas de trabajo en la investigación

A continuación, se explican los procedimientos desarrollados para cada una de las áreas de trabajo marcadas en color azul, quedando las marcadas en color rojo para su preparación en otras publicaciones.

2.2 Criterios de selección de las ciudades por estudiar

Con un enfoque pragmático, se partió de la definición de zona metropolitana, la cual se considera como la agrupación en una sola unidad de municipios completos que comparten una ciudad central y están altamente interrelacionados funcionalmente. Así, se tomaron en cuenta varios criterios para decidir el tipo de zonas metropolitanas de interés para llevar a cabo la investigación. De igual forma, en términos de ciudades se excluyeron las grandes aglomeraciones del país para privilegiar el estudio de las ciudades medias, pues la literatura internacional reporta una cantidad considerable de casos de estudio en capitales nacionales (de países desarrollados y en escasa medida, de países en desarrollo). Además, se consideró que las ciudades medias constituyen los motores de crecimiento de los países, pero tienen menos recursos y menores capacidades técnicas, lo que dificulta la implementación de proyectos, por lo tanto, dependen en mayor medida de las transferencias de recursos del gobierno nacional o de recursos que puedan obtener prestados, y en general no están verdaderamente preparadas para enfrentar desafíos como el del cambio climático.

El procedimiento para obtener y procesar la información estadística y de campo consistió de varios pasos. Se partió de los estudios realizados por el Consejo Nacional de Población (SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2012) en los que definen las principales zonas metropolitanas del país. A partir de esa información, se definió como un criterio de selección a las zonas metropolitanas con un rango de población de 400,000 a 2'000,000 de habitantes. Otros criterios de selección consideraron los análisis efectuados por el Instituto Mexicano para la Competitividad (IMCO, 2014), y por último, se privilegiaron ciudades que tuvieran constituidos sus Institutos Municipales o Metropolitanos de Planeación (IMPLAN).

2.3 Adaptación de la herramienta de trabajo

Por lo que respecta a la herramienta para la generación de indicadores, el método empleado tiene su origen en el índice denominado “Urban Freight Transport Index” (UFTI) o Referencial de Análisis para el Transporte Urbano de Carga (RATUC) (Betanzo, 2007). Este índice fue desarrollado experimentalmente como un intento por medir de manera integral el estado general que guarda el transporte de carga en las ciudades. En su versión original, ese índice contiene 34 indicadores compilados en cuatro grupos de evaluación, con 234 reactivos (Figura 2), y cinco etapas o plazos de intervención. Para una explicación completa de cómo se diseñó ese índice ver Betanzo et al. (2013).

Este índice es la base para la evaluación y comparación de las ciudades estudiadas.

| | | VALOR MAXIMO |
|----------|--|--------------|
| 1 | MEDIDAS PLANEADAS O IMPLEMENTADAS A NIVEL NACIONAL | |
| 1.1 | <i>Definición de las políticas nacionales en materia de transporte urbano de carga</i> | 54 |
| 1.2 | <i>Uniformización de medidas aplicadas</i> | 20 |
| 1.3 | <i>Determinación de restricciones de acceso</i> | 23 |
| 1.4 | <i>Restricciones de estacionamiento para camiones de carga</i> | 8 |
| 1.5 | <i>Acondicionamiento de zonas de carga/descarga</i> | 2 |
| 1.6 | <i>Generación de centros de distribución</i> | 19 |
| 1.7 | <i>Libramientos</i> | 6 |
| 1.8 | <i>Medidas para reducir el ruido</i> | 13 |
| 1.9 | <i>Cobros o impuestos</i> | 8 |
| 1.10 | <i>Subsidios o incentivos</i> | 15 |
| 1.11 | <i>Apoyo para la investigación y desarrollo</i> | 15 |
| 1.12 | <i>Apoyo para proyectos piloto</i> | 11 |
| 1.13 | <i>Difusión de información</i> | 25 |
| | SUBTOTAL | 219 |
| | | |
| | | VALOR MAXIMO |
| 2 | MEDIDAS PLANEADAS O IMPLEMENTADAS A NIVEL LOCAL O REGIONAL | |
| 2.1 | <i>Definición de la política local (estatal y municipal) en materia de transporte urbano</i> | 14 |
| 2.2 | <i>Restricciones de acceso</i> | 104 |
| 2.3 | <i>Restricciones de estacionamiento de camiones de carga</i> | 12 |
| 2.4 | <i>Acondicionamiento de zonas de carga y de descarga</i> | 35 |
| 2.5 | <i>Centros de distribución y consolidación de entregas apoyados por la autoridad local</i> | 82 |
| 2.6 | <i>Apoyo para la realización de proyectos piloto</i> | 4 |
| 2.7 | <i>Corredores (carriles dedicados) para camiones de carga</i> | 5 |
| 2.8 | <i>Uso de opciones intermodales a nivel urbano</i> | 5 |
| 2.9 | <i>Integración del transporte en la planeación urbana</i> | 35 |
| 2.10 | <i>Tránsito</i> | 21 |
| 2.11 | <i>Pavimentos</i> | 7 |
| 2.12 | <i>Contaminación</i> | 60 |
| | SUBTOTAL | 384 |
| | | |
| | | VALOR MAXIMO |
| 3 | ELEMENTOS DE ANALISIS PARA LA TOMA DE DECISIONES | |
| 3.1 | <i>Percepción de la importancia del transporte urbano de carga</i> | 41 |
| 3.2 | <i>Foros de discusión sobre transporte urbano de carga</i> | 44 |
| 3.3 | <i>Falta de conciencia y conocimientos técnicos</i> | 5 |
| 3.4 | <i>Falta de instrumentos de evaluación antes y después</i> | 24 |
| | SUBTOTAL | 114 |
| | | |
| | | VALOR MAXIMO |
| 4 | MEDIDAS IMPLEMENTADAS POR EL SECTOR PRIVADO | |
| 4.1 | <i>Transportistas: Reducción del parque vehicular de carga</i> | 40 |
| 4.2 | <i>Transportistas: Uso de sistemas de transporte inteligente</i> | 14 |
| 4.3 | <i>Productores y detallistas: Procesos</i> | 17 |
| 4.4 | <i>Indicadores de desempeño logístico</i> | 24 |
| 4.5 | <i>Industria automotriz: Innovación Tecnológica</i> | 14 |
| | SUBTOTAL | 109 |

Figura 2. Concentrado de indicadores contenidos en el Índice RATUC V1.0

Fuente: Betanzo (2007)

2.4 Análisis de determinantes del transporte urbano de carga

A partir de la propuesta metodológica de Betanzo (2015) en la que se estudian las perspectivas del crecimiento urbano, la actividad comercial minorista y su relación transversal con el transporte de bienes, se consideró de utilidad la generación de bases de datos de las zonas metropolitanas con información de carácter agregado del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). El propósito de esta actividad consiste en

caracterizar las distintas zonas metropolitanas mediante variables de tipo agregado que reflejan parte de la problemática del transporte de carga en las distintas áreas urbanas del país. A partir de esas bases de datos, se prepararon Fichas Técnicas *Ex-ante* para cada zona metropolitana en las que se describen las siguientes variables estudiadas estadísticamente: tendencias de crecimiento de la población, tendencias de crecimiento del parque vehicular de carga, tendencias de crecimiento en el número de establecimientos comerciales, tendencias en la tasa de motorización pesada, relación entre Unidades Económicas y población, y densidad de Unidades Económicas por km². La fundamentación para estudiar dichos determinantes se explica a continuación.

2.4.1 Tendencias de crecimiento de la población

El crecimiento acelerado de las ciudades y de la población, como se manifiesta en muchas ciudades mexicanas, no puede dissociarse de las transformaciones que experimentan los sistemas de distribución de bienes, los cuales tienden a reestructurarse para adaptarse a los hábitos de consumo y a las nuevas y cambiantes configuraciones de las ciudades y sus periferias. La tendencia en la expansión poblacional y urbana induce transformaciones en la función espacial del transporte de mercancías y en los costos de los desplazamientos, no sólo de los camiones repartidores sino también de las personas para acceder a puntos de venta final donde se expenden los bienes de consumo duradero y no duradero. Así, detrás de esta actividad se encuentran subyacentes muchos fenómenos incitados por nuevas condiciones de demanda de bienes de consumo para la población, los cuales deben tomarse en cuenta para entender y proponer medidas apegadas a la realidad.

2.4.2 Tendencias del parque vehicular de carga

La información sobre el origen y destino de los viajes de los camiones de carga pesados y ligeros que circulan en entornos urbanos suele ser escasa, aun en las ciudades de países desarrollados. A falta de ese tipo de datos, el empleo de información agregada permite aportar indicadores sobre la presencia de vehículos de carga en las ciudades y su relación con la población y la actividad comercial local. No obstante, es preciso aclarar que esas estadísticas agregadas sobre el parque vehicular de carga registrado a nivel municipal subestiman la proporción real de camiones comerciales en circulación, en la medida en que hay una cantidad no determinada de vehículos de carga “flotantes” registrados en otras entidades del país, que circulan libremente dentro de las zonas urbanas para suministrar de bienes a los establecimientos comerciales o de servicios.

2.4.3 Tendencias de crecimiento de las Unidades Económicas

El aumento en el número de establecimientos comerciales, industriales o de servicios (Unidades Económicas), particularmente las del primer tipo, constituye una respuesta ante el crecimiento de la población en función de su capacidad adquisitiva, y en consecuencia aparecen para cubrir el incremento en la demanda de bienes tanto en áreas centrales como en la periferia de las ciudades. Por el número de establecimientos comerciales, este sector económico predomina en la dinámica de las ciudades, e influye de manera determinante

sobre la intensidad de uso de la infraestructura vial (horarios de reparto, uso de vías primarias, secundarias y colectoras). Ello incluye la circulación de los vehículos comerciales y sobre todo las maniobras de carga y descarga en la vía pública. De ello se deriva que la atención sobre el transporte de carga en las ciudades no debe concentrarse exclusivamente en el transporte pesado o de largo itinerario, sino sobre todo en el reparto local de bienes, y sugiere realizar los estudios sobre el sector comercio como un aspecto determinante de la dinámica urbana.

2.4.4 Tasa de Motorización Pesada

La tasa de motorización pesada es un indicador complementario a la tasa de motorización de automóviles particulares, que mide la densidad de vehículos de carga en una aglomeración urbana. Se expresa por el cociente del número de vehículos de carga dividido por cada mil habitantes. En la medida en que los datos necesarios para su determinación se encuentran por lo general disponibles en las estadísticas nacionales, se convierten en un indicador muy simple de obtener.

2.4.5 Densidad de Unidades Económicas en función del área urbana

La densidad de unidades económicas por km² en áreas urbanizadas, sobre todo de carácter comercial, encuentra su relación con la concentración de la población. Los determinantes estudiados buscan establecer en órdenes de magnitud cómo el crecimiento de la población induce la creación de establecimientos comerciales, que a su vez generan más flujos de carga, y de ello se deriva un mayor número de camiones en circulación. Esto significa que a mayor demanda de transporte también es posible esperar más maniobras de carga y descarga en la vía pública, con potenciales afectaciones a las condiciones de tránsito local, además de requerimientos relacionados con el tipo de vehículos de carga e infraestructura logística urbana.

2.5. Protocolo de intervención para el trabajo de campo

Esta etapa forma parte del trabajo de campo, para el cual se diseñó un protocolo de intervención, con una agenda de trabajo sustentada en el apoyo de interlocutores locales.

2.5.1 Interlocutores locales

Para iniciar este proceso, se establece contacto por correo electrónico y telefónico con el potencial interlocutor local, preferentemente con los directores de los distintos Institutos Municipales o Metropolitanos de Planeación (IMPLAN). Se explica el propósito del proyecto y de la intención de realizar una visita, solicitando contar con su liderazgo local para convocar a distintas autoridades municipales e intermunicipales relacionadas con el transporte, el desarrollo urbano y el medio ambiente.

2.5.2 Ejecución del trabajo de campo

El trabajo de campo se lleva a cabo en dos fases. En la primera se sostienen dos reuniones de intervención, primero con el interlocutor local y posteriormente con funcionarios

relacionados que hayan sido convocados. En ambas reuniones se insiste en el propósito del proyecto, los alcances, metodología empleada, resultados esperados. Además, se describen los determinantes estadísticos provenientes de las Ficha *Ex-Ante* de cada ciudad visitada. Esas reuniones son importantes para conocer lo que los municipios hacen en relación a este tema. En esas reuniones también se solicita la colaboración de los funcionarios locales para proporcionar información útil que permita alimentar las bases de datos del índice RATUC, cuya estructura final se muestra más adelante. La segunda fase del trabajo de campo consiste en un recorrido técnico por la ciudad con guía de algún representante local para observar y documentar gráficamente las áreas conflictivas o las acciones implementadas para solucionar problemas de transporte urbano de carga.

2.6 Áreas de trabajo complementarias.

La integración de datos e información obtenida en campo se realiza mediante un informe técnico de cada zona metropolitana, procesando además la información recopilada en campo para generar el índice RATUC 2.0 (*c.f.* 3.2) aplicado en la investigación. El informe final contendrá además una revisión de los instrumentos de planeación y regulación, así como una revisión de aspectos normativos en materia ambiental relacionados con el transporte de carga en las ciudades estudiadas. Finalmente, el informe final contendrá un conjunto de propuestas en apoyo al diseño de políticas públicas en materia de energía y desarrollo sustentable.

3. RESULTADOS

Al término de la primera etapa de la investigación, se tienen algunos resultados iniciales que se describen a continuación.

3.1 Ciudades seleccionadas

A partir de los criterios metodológicos, el universo se redujo a 12 zonas metropolitanas seleccionadas (Tabla 1), buscando una diversidad tal que rindiera cuenta de las características y diferencias regionales en el país (Figura 3). Se tomó en cuenta el tiempo previsto de ejecución del proyecto y los recursos humanos disponibles, concluyéndose que un número razonable de zonas metropolitanas sería 12 de las 56 establecidas por el Consejo Nacional de Población (CONAPO).

3.2 Herramienta de trabajo (RATUC V2.0)

Se hizo la revisión metodológica del Referencial de Análisis para el Transporte Urbano de Carga V1.0 (RATUC) para adaptarlo a los objetivos del proyecto. Esta adaptación se apoyó en una guía publicada por el Transportation Research Board (Holguín-Veras et al., 2015) donde se estudian distintas iniciativas de intervención que han sido implementadas a nivel global. A partir de esta revisión, se reagruparon y reordenaron los indicadores contenidos en la estructura del índice original (Figura 2), pasando de 4 a 9 los grupos de análisis. El resultado de esta revisión dio origen a la versión RATUC 2.0, cuya estructura se muestra en la Figura 4 y que será explicada con detalle en otra publicación.

A manera de ejemplo, la Tabla 2 presenta algunos de los reactivos contenidos dentro del indicador “Planeación y Políticas Públicas”.

3.3 Síntesis de los determinantes analizados para el conjunto de ciudades estudiadas

En razón del límite de espacio para incluir aquí los resultados preliminares, lo que se presenta a continuación está a nivel de síntesis del conjunto de zonas metropolitanas, independientemente de que dentro de la investigación el análisis se lleva hasta al nivel municipal.

3.3.1 Tendencias de población

El primer determinante examinado corresponde al fenómeno demográfico y de expansión urbana. Los datos del INEGI de los años 1990, 2000 y 2010, permiten identificar las tendencias de crecimiento poblacional en las zonas metropolitanas, las cuales de acuerdo al tamaño de su población se encuentran en el siguiente orden: Toluca, Tijuana, León, Querétaro, San Luis Potosí-Soledad de Graciano, Mérida, Aguascalientes, Chihuahua, Villahermosa, Tuxtla Gutiérrez, Tlaxcala-Apizaco y Tepic (Tabla 1). En la Figura 5 se observa que en los últimos 20 años se manifiesta un continuo crecimiento de la población de estas áreas urbanas mexicanas.

3.3.2 Tendencias del parque vehicular de carga

La Figura 6 muestra el patrón de crecimiento del parque vehicular de carga en las zonas metropolitanas seleccionadas en el período 1980-2013. La Zona Metropolitana de Tijuana (ciudad fronteriza al norte del país) presenta el mayor número de camiones y camionetas de carga para el año 2013, alcanzando 138,482 unidades, mientras que en el caso contrario se encuentra Tlaxcala (ciudad en el centro del país) con 22,447 vehículos de carga registrados en el mismo año.

3.3.3 Tendencias de crecimiento de las Unidades Económicas

Se obtuvo el total de Unidades Económicas en las Zonas Metropolitanas, considerando los sectores Comercio e Industria Manufacturera en los años 1999, 2004 y 2009 (Figura 7). En todos los casos se observa la mayor proporción de establecimientos del sector comercial con respecto al manufacturero, junto con un crecimiento sostenido del primero.

Además, para el estudio de ese determinante, se estimó la relación que existe entre las unidades económicas por cada mil habitantes en las diferentes zonas metropolitanas. Como se observa en la Figura 8, la zona metropolitana de Tlaxcala (ubicada en el centro del país) cuenta con una tasa mayor en comparación a las otras zonas metropolitanas, siendo la ciudad fronteriza de Tijuana la que cuenta con la menor tasa.

Tabla 1. Zonas Metropolitanas seleccionadas

| Código | Zonas metropolitanas definidas por CONAPO 2010 | Población (hab) (2010) |
|--------|--|------------------------|
| 24 | Toluca | 1,936,126 |
| 2 | Tijuana | 1,751,430 |
| 14 | León | 1,609,504 |
| 36 | Querétaro | 1,097,025 |
| 38 | San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez | 1,040,443 |
| 55 | Mérida | 973,046 |
| 1 | Agascalientes | 932,369 |
| 12 | Chihuahua | 852,533 |
| 41 | Villahermosa | 755,425 |
| 10 | Tuxtla Gutiérrez | 684,156 |
| 46 | Tlaxcala-Apizaco | 499,567 |
| 30 | Tepec | 429,351 |

Fuente: SEDESOL-CONAPO-INEGI, 2012

**Figura 3. México: Mapa con la ubicación de las zonas metropolitanas seleccionadas para la investigación**

Fuente: SEDESOL-SEGOB-CONAPO, 2012, con modificaciones propias

Tabla 2. Reactivos contenidos en el indicador sobre planeación y políticas públicas

| INICIATIVA | OPERADOR (C) | CIUDAD (n) | RAT UC SDT | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 |
|---|-------------------------|-------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 9.Planeación y Políticas Públicas | | 26 | 37 | 6 | 16 | 15 | 0 | 0 |
| Planeación y Política Pública Local | | 0 | 11 | 2 | 6 | 3 | 0 | 0 |
| Existe algún plan global de movilidad para la ciudad en el que se incluya el transporte de mercancías | 2 | | 2 | | 2 | | | |
| Existe un política de Desarrollo del transporte urbano de carga a nivel municipal | 2 | | 2 | | 2 | | | |
| Existe una política de Desarrollo del transporte urbano de carga a nivel metropolitano | 3 | | 3 | | | 3 | | |
| Se ha evaluado la capacidad de la red vial frente a la demanda actual y futura de la ciudad | 2 | | 2 | | 2 | | | |
| Se conocen las tendencias del comportamiento potencial del tráfico de camiones de carga dentro de la ciudad | 1 | | 1 | 1 | | | | |
| Existen diagnósticos de las fuentes de conflicto entre la carga y el uso de suelo | 1 | | 1 | 1 | | | | |

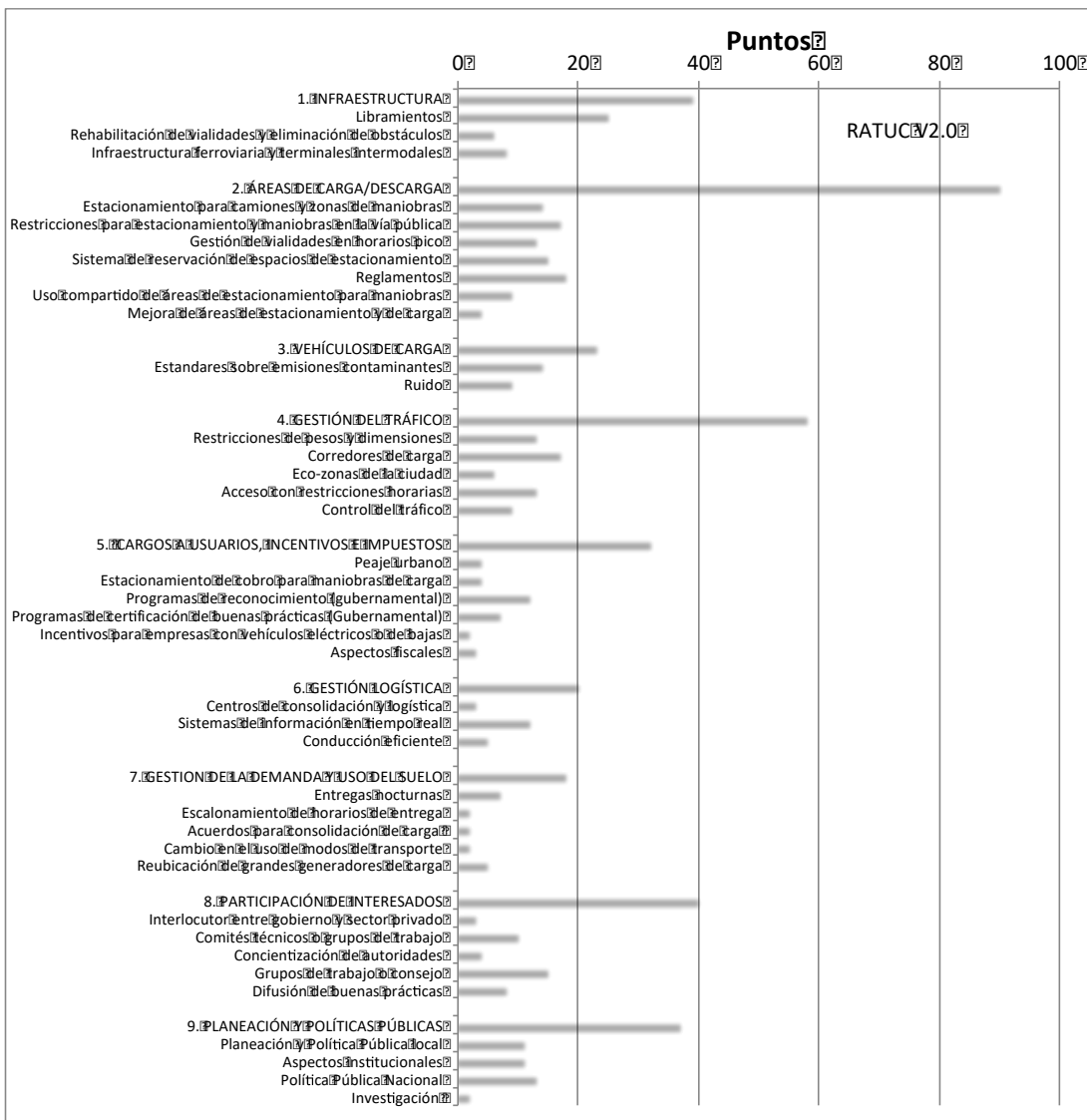


Figura 4. Estructura general de indicadores e índice RATUC V2.0

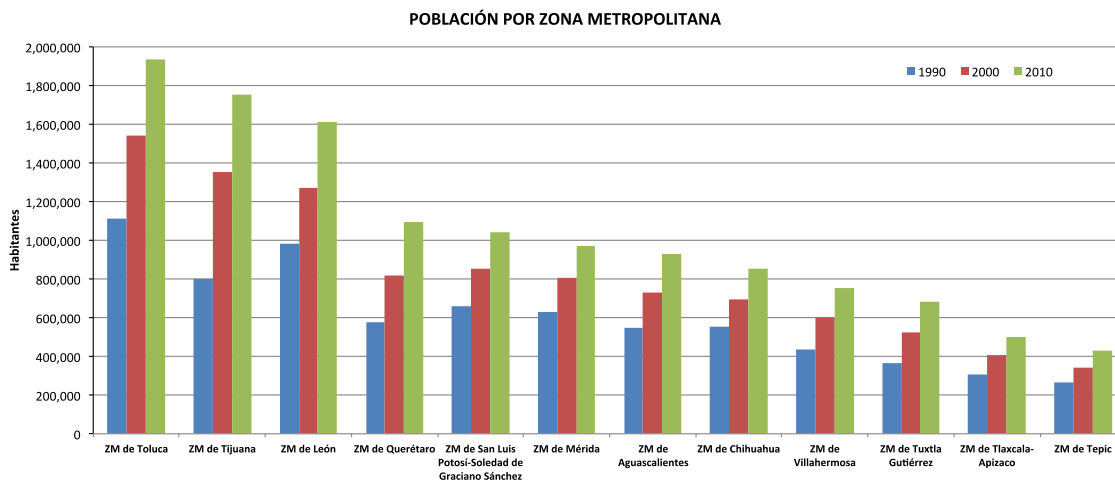


Figura 5. Población de las 12 Zonas Metropolitanas en los años 1990, 2000 y 2010

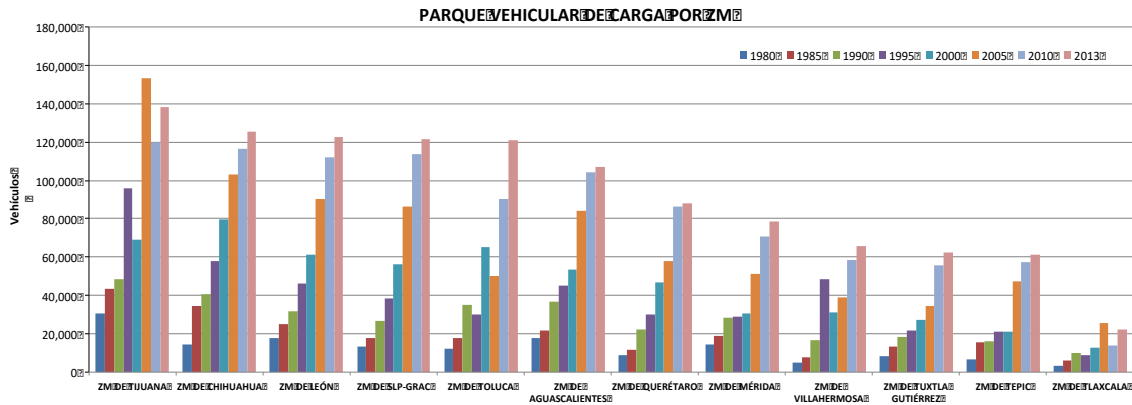


Figura 6. Parque Vehicular de Carga en las 12 ZM de 1980 al 2013

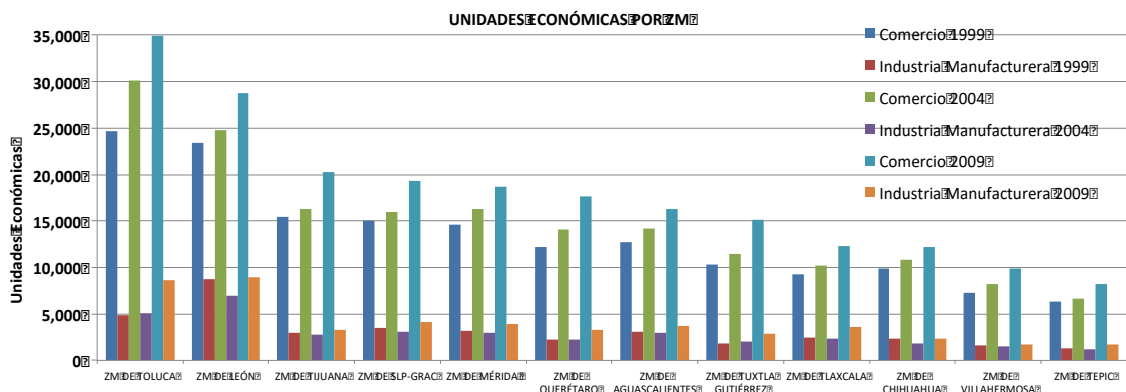


Figura 7. Tendencia de Unidades Económicas en las 12 zonas metropolitanas

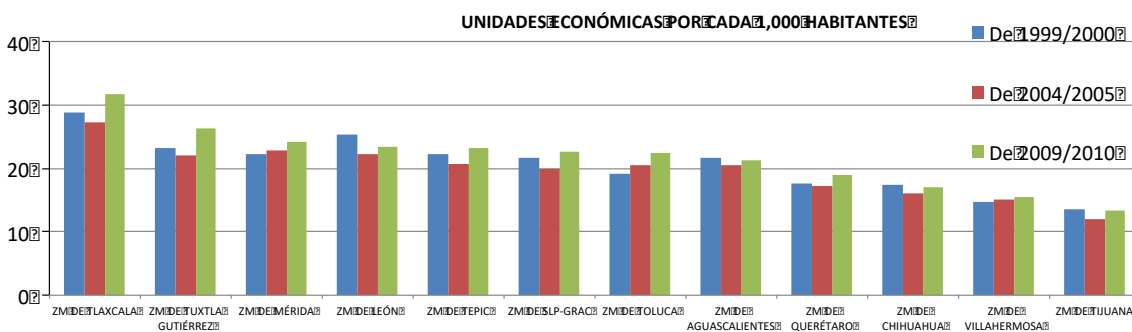


Figura 8. Unidades Económicas por cada mil habitantes

3.3.4 Tasa de Motorización Pesada

Las estadísticas estatales y municipales sobre camiones del servicio público, privado y oficial de carga permiten dimensionar parte de la problemática que se vive en las ciudades mexicanas, como lo demuestra la tendencia en las tasas de motorización pesada en las 12 zonas metropolitanas estudiadas (Figura 9). Tan sólo hay que considerar que esas estadísticas son la base de las estimaciones de emisiones contaminantes de fuentes móviles mediante "software" especializado. En el año 2010, el municipio de Chihuahua y su zona metropolitana al norte del país reportan la mayor tasa con 136.71 camiones y camionetas de carga por cada mil habitantes, y en el caso extremo a Tlaxcala con una tendencia ligeramente

decreciente. Un valor de referencia importante es la tasa generalizada de motorización que en su nivel de saturación en un escenario de mitigación de emisiones al año 2050 deberá alcanzar los 600 vehículos por mil habitantes (Solís y Sheinbaum, 2016).

3.3.5 Densidad de Unidades Económicas en función del área urbana

Otro determinante estudiado fue la relación entre Unidades Económicas (UE) por kilómetro cuadrado. La Figura 10 muestra que la zona metropolitana de Tlaxcala en el centro del país alcanza la mayor tasa con 22.42 UE/km², seguido de la de León con 21.39 UE/ km² en la región del Bajío, también al centro del país. La zona metropolitana de Chihuahua muestra la menor tasa del conjunto de ciudades.

Si bien hay que considerar que las series estadísticas generadas con información de INEGI no son homogéneas con respecto a su periodicidad, es posible mostrar con claridad el tipo de tendencia para cada uno de los determinantes analizados y orientar futuras investigaciones.

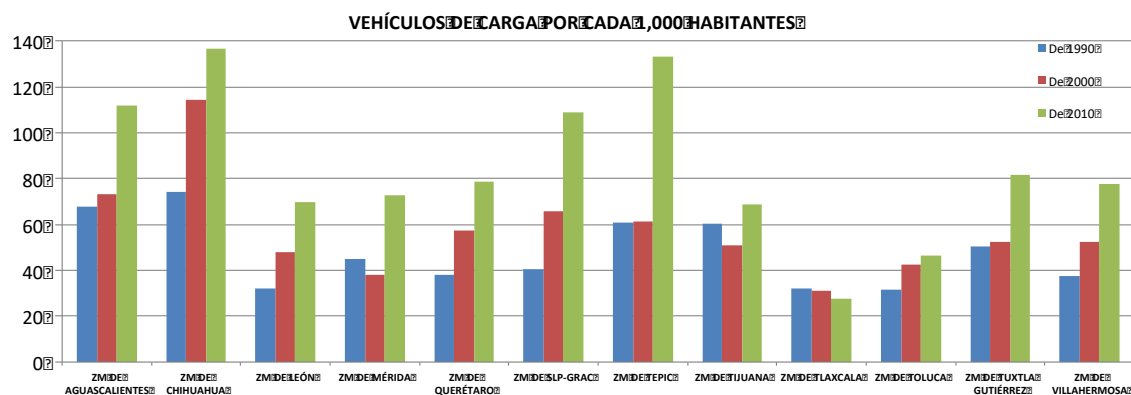


Figura 9. Tendencia de número de vehículos de carga por cada mil habitantes en las Zonas Metropolitanas, en los años 1990, 2000 y 2010

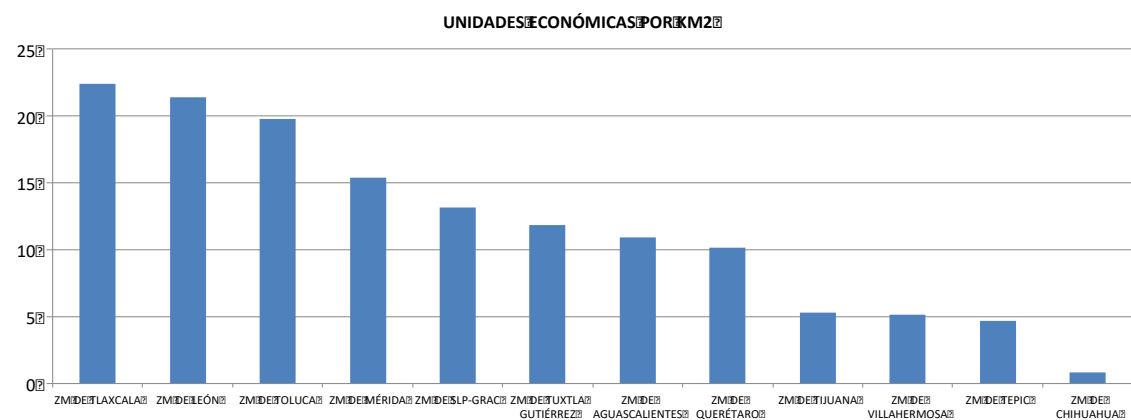


Figura 10. Unidades Económicas por kilómetro cuadrado en las 12 zonas metropolitanas

4. CONCLUSIONES PRELIMINARES

Se presentan los antecedentes y características de una investigación en desarrollo, que tiene como propósito la generación de indicadores de desempeño del transporte urbano de carga, en apoyo al diseño de políticas energéticas y de desarrollo sustentable en México. El artículo describe la metodología empleada para la investigación y una caracterización de 12 áreas urbanas bajo estudio mediante una serie de determinantes. Con datos estadísticos agregados se dimensionó la relación transversal que existe entre variables inscritas en el tema del transporte urbano de carga: población, parque vehicular de carga y establecimientos comerciales. Desde el punto de vista macroeconómico, en las doce áreas metropolitanas se observan tendencias predominantemente crecientes en función del tiempo, con ritmos de crecimiento que dependen de las características de cada una de las zonas urbanas. Los datos obtenidos sirven hasta el momento para hacer comparaciones iniciales entre ciudades de distintas regiones del país.

Una vez concluida la investigación se podrá rendir cuenta de la situación de las distintas zonas metropolitanas en materia de transporte urbano de carga, mediante un análisis estadístico más detallado y con la obtención del índice esperado, para orientar algunas recomendaciones en materia de infraestructura de transporte, de normatividad ambiental en el marco de políticas públicas de carácter nacional y local.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece el financiamiento del CONACYT, a través de la Convocatoria Proyectos de Desarrollo Científico para Atender Problemas Nacionales PDCPN-2013-01-212975.

REFERENCIAS

- ALLEN, J., THORNE, G. Y BROWNE, M. (2007). *Good practice guide on urban freight*. Netherlands, Best Urban Freight Solutions, 84 p. Disponible en: http://www.bestufs.net/download/BESTUFS_II/good_practice/English_BESTUFS_Guide.pdf
- BETANZO QUEZADA, E. (2007). *Propuesta de un modelo de desarrollo del transporte urbano de carga en Querétaro*. Santiago de Querétaro, México, Universidad Autónoma de Querétaro, 2007, 125 p.
- BETANZO-QUEZADA, E. (2015). *Perspectivas del crecimiento urbano: la actividad comercial minorista y el transporte de bienes en la Zona Metropolitana de Querétaro*. México, Ciencia Ergo Sum, 22(1): 63-74, marzo-junio, 2015.
- BETANZO-QUEZADA, E., ROMERO-NAVARRETE, J. A. Y OBREGÓN-BIOSCA, S. (2013). *Un Referencial para Evaluar la Gestión Pública en Transporte Urbano de Carga*, Revista Gestión y Política Pública (CIDE) 22(2): 313-354.
- GOBIERNO DE MÉXICO, GM (2013a). *Estrategia Nacional de Cambio Climático*

(ENCC). Visión 10-20-40. México, 64 p.

GOBIERNO DE MÉXICO, GM (2013b). *Evaluación del desempeño y sustentabilidad ambiental en ciudades intermedias de México Zona Metropolitana de Querétaro*. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Gobierno de México, México, 136 p. Disponible en: http://www.inecc.gob.mx/descargas/sqre/2013_eval_desem_zmq.pdf

HOLGUÍN-VERAS, J., AMAYA-LEAL, J., WOJTOWICZ, J., JALLER, M., GONZÁLEZ-CALDERÓN, C., SÁNCHEZ-DÍAZ, I., WANG, X., HAAKE, D., RHODES, SUZANN S., FRAZIER, R., NICK, M., DACK, J., CASINELLI, L. Y BROWNE, M. (2015). *Improving Freight System Performance in Metropolitan Areas: A Planning Guide, National Cooperative Freight Research Program*. NCFRP Report 33. Washington, DC: Transportation Research Board, 200 p.

INSTITUTO MEXICANO PARA LA COMPETITIVIDAD, IMCO (2014). *Índice de competitividad urbana 2014*. México, 278 p. Disponible en: http://imco.org.mx/indices/documentos/2014_ICU_Libro_La_gobernanza_de_las_ciudades_y_el_territorio_en_Mexico.pdf

INSTITUTO NACIONAL DE ECOLOGÍA Y SECRETARÍA DE MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, INE-SEMARNAT (2006). *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990-2002*. Gobierno de México. México. Disponible en: <http://www.inecc.gob.mx/cpcc-lineas/597-cpcc-inventario>

ODETTE (2013). *Guidelines for reporting freight greenhouse gas emissions*. Version No: 1.0, Ref. No: LG08, Organization for Data Exchange by Tele-Transmission in Europe, 109 p. Disponible en: <https://www.odette.org/publications/file/guidelines-for-reporting-freight-greenhouse-gas-emissions>

SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL, SEDESOL (2010). *La Expansión de las ciudades: 1980-2010 en México*. Gobierno de México, México.

SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL, CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN E INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2007). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2005*. Gobierno de México, México. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2005

SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL, CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN E INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, SEDESOL-CONAPO-INEGI. (2012). *Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2010*. Gobierno de México, México. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Zonas_metropolitanas_2010

SECRETARÍA DE DESARROLLO SOCIAL, SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN, CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN, SEDESOL-SEGOB-CONAPO. (2012). *Sistema Urbano Nacional 2012*. Gobierno de México, México. Disponible en: http://www.conapo.gob.mx/en/CONAPO/Catalogo_Sistema_Urbano_Nacional_2012

SOLÍS-AVILA, J. Y SHEINBAUM-PARDO, C. (2016). *Consumo de energía y emisiones de CO2 del autotransporte en México y escenarios de mitigación*. Revista Internacional de Contaminación Ambiental, 32(1): 7-23.

29 Simulación de la logística del transporte en TRANUS Caso de estudio: movilización de productos y subproductos de la Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela

Patricia López

Modelística SA de CV, Venezuela

RESUMEN

La Faja Petrolífera del Orinoco en Venezuela aportará al país una cantidad de petróleo que garantizará un ingreso económico importante para las próximas décadas. Para explotar la reserva natural, que se encuentra al sur del país, se deben movilizar a través de las vías terrestres y fluviales existentes, materiales para la construcción de infraestructura e insumos y subproductos de la operación del sistema de extracción y mejoramiento de crudos. Para los subproductos de la explotación, en particular del coque, hay dos opciones: (1) usarlo como combustible de termoeléctricas o, (2) transportarlo a puertos para ser exportado. Con un modelo de transporte se evalúa el impacto económico de esas dos alternativas.

Palabras clave: Movilización de productos y subproductos, coque, Faja Petrolífera del Orinoco, logística.

1. INTRODUCCIÓN

El objetivo de este artículo es presentar los resultados de un estudio de logística del transporte de los productos y subproductos petroleros y también de las personas que laborarán en el área de explotación en la región de la Faja Petrolífera del Orinoco en Venezuela.

Con este objetivo, el estudio se definió como una red con zonas de producción y zonas de consumo y arcos de comunicación de diversas características. Este modelo se aplicó para evaluar las diversas alternativas de traslado de los materiales y las personas sobre la red carretera, ferroviaria y fluvial. Finalmente se identificó la mejor alternativa del transporte y su incidencia a corto y mediano plazo.

La Faja Petrolífera del Orinoco (Figura 1) contiene la acumulación de petróleo extrapesado más grande del mundo, con una extensión aproximada de 55,314 Km² y un estimado de petróleo in situ de 1,300 MMMBLS (1,3 billones de barriles) en un área de explotación actual de 11,593 km². Se encuentra ubicada entre los estados de Monagas, Anzoátegui y Guárico delimitado por el río Orinoco al sur y a una distancia de 450 Km de Caracas, en Venezuela.

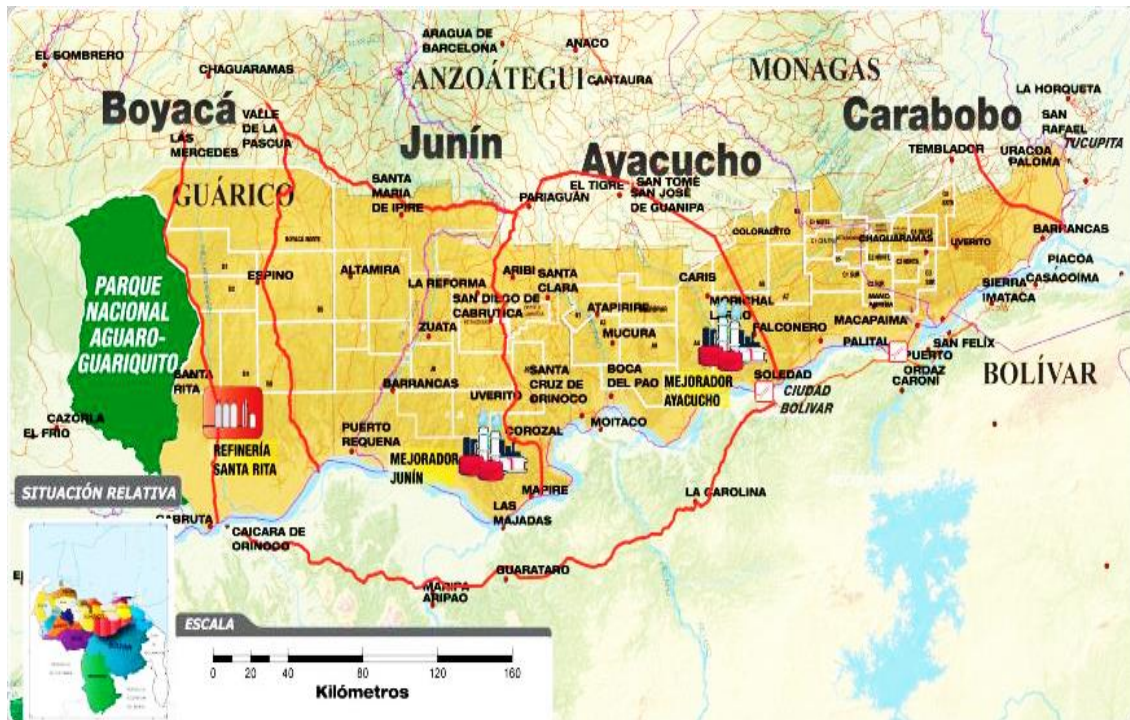


Figura 1. Faja Petrolífera del Orinoco

Fuente: Estudio Marco de Prospectiva Urbano Regional de Transporte para el Proyecto Socialista Orinoco, Modelística, 2012

Para realizar esta investigación se utilizó el modelo Tranus, desarrollado por De La Barra, (2005) que es una herramienta de información para la toma de decisiones en estudios de transporte. El sistema de modelos Tranus se utiliza para simular el impacto que tendrán las diversas políticas sobre el transporte, el desarrollo urbano y la actividad económica, no solamente de los estados en los que se encuentra la actividad petrolera sino sobre todo el país.

Tranus es un modelo de simulación integral de la localización de actividades, usos del suelo y de transporte, que puede ser aplicado tanto a escala regional como urbana. Está especialmente orientado a la simulación de los efectos probables de la aplicación de políticas y proyectos diversos en ciudades o regiones, y evaluarlos desde un punto de vista social, económico, financiero, energético y ambiental.

El sistema permite representar tanto los movimientos de carga como de pasajeros en transporte público y privado, en una misma red de transporte, para conocer el efecto conjunto sobre la capacidad de la infraestructura. En aplicaciones urbanas, se suele dar prioridad a la representación de los movimientos de pasajeros, incluyendo exógenamente los movimientos de carga, para incluir su efecto en la congestión. En aplicaciones regionales o nacionales, como es el caso que se describe aquí, ambos elementos, carga y pasajeros, son igualmente relevantes. En este caso, es posible realizar una completa contabilidad tipo insumo-producto, con representación explícita de importaciones y exportaciones, y evaluar su efecto en la utilización de la red multimodal de transporte.

Tranus no utiliza asignación por equilibrio. En su lugar utiliza un modelo probabilístico basado en modelos de decisión discretos tipo logit como lo mencionan en su artículo los autores, De la Barra et al., (1999), el cual produce resultados mucho más realistas que el modelo de equilibrio, especialmente en condiciones de bajos niveles de congestión. En Tranus, además, puede asignar múltiples categorías de usuarios, cada uno con diferentes valoraciones del tiempo y sensibilidad a las características del transporte.

El modelo calcula los costos de operación de los vehículos con mucho detalle, de tal manera que es posible realizar una buena evaluación económica para medir los ahorros en costo para los vehículos que utilizarán cada alternativa de transporte. El modelo también permite calcular los costos de mantenimiento de las vías en función de las características de las mismas, pero también del tráfico y su composición vehicular. El modelo también lleva cuenta detallada de los pagos por concepto de peaje, lo cual será de gran utilidad para analizar escenarios con esta opción.

2. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

2.1 Construcción del modelo de transporte

Lo primero que se realizó fue la codificación de la red de transporte actual de la zona de estudio (infraestructura carretera, ferroviaria y fluvial). El escenario de la situación actual, denominado escenario base, se conformó con datos del año 2012. La red abarcó a todo el país pues un proyecto de la envergadura de la movilización de productos petroleros de la mayor reserva de petróleo, impactará a todo el país.

Por consiguiente, cada arco o enlace de la red de transporte se codificó de acuerdo a un tipo de modo y asociada a ese tipo, se incluyó la información de las características de operación y de mantenimiento. Los tipos de arcos codificados fueron: autopista, calles pavimentadas, calles urbanas, ríos (aguas arriba, aguas abajo) y vías férreas.

En la Figura 2, se muestra una gráfica de la presentación en pantalla de la red de transporte en el modelo Tranus. Se pueden distinguir gráficamente las vías terrestres de color café, las vías fluviales de color azul marino y las férreas de color rojo.

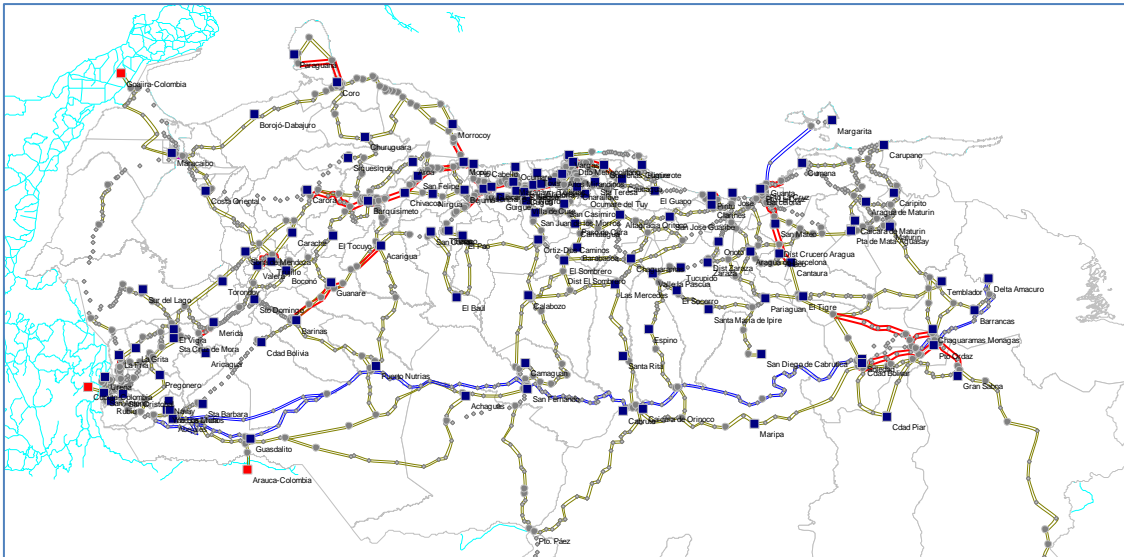


Figura 2. Red vial de transporte codificada

Fuente: Elaboración propia de la base de datos de Tranus, Modelística, 2012

Luego se codificó la información de los operadores de la red que representan la oferta de movilidad (fluvial y terrestre): vehículos privados, vehículos de carga, ferrocarriles, barcazas, etc. Cada operador también fue caracterizado, codificándose su tarifa, capacidad y costos de uso de energía.

Seguidamente se introdujo la información de la demanda. La demanda está representada en matrices exógenas, es decir matrices de los viajes en todas sus categorías, para la carga y los pasajeros. Para determinar los movimientos de materiales específicamente sus orígenes a destinos se realizó el siguiente procedimiento general:

- Identificación de los orígenes: canteras y minas (piedra, arena), siderúrgicas (acero y tubulares), industrias manufactureras nacionales y puertos (manufactura e importación de equipos para la exploración y producción petrolera) y cementeras en la Faja Petrolífera del Orinoco, cercana a ésta y en todo el territorio nacional.
- Estimación de costos de transporte entre orígenes (localización de la oferta) y destinos (localización de la demanda) con el modelo Tranus.
- Selección de los orígenes que resultan en el menor costo de transporte.
- Optimización de los movimientos de carga entre orígenes y destinos para los casos de restricciones de la oferta.
- Elaboración de las matrices definitivas por año de construcción.

2.2 Resultados del escenario base

Una vez que el modelo realizó la asignación de viajes, se extrajeron los primeros resultados para realizar la calibración que es un proceso de carácter iterativo sobre el principio de ensayo-error, comparando las cifras de pasajeros y de carga en toneladas arrojadas por el modelo con los datos obtenidos de los aforos sobre las secciones de la red vial. Como este estudio tuvo una proyección nacional, el modelo fue calibrado para reflejar fielmente los

patrones de tránsito en la red vial del país. Sin embargo, se hizo énfasis en el área de estudio de la explotación de crudo. Para evaluar el grado de ajuste del modelo se calculó el valor de correlación para estimar el grado de relación lineal entre los resultados de la simulación y los aforos.

La Figura 3 muestra la comparación entre los aforos y la asignación del modelo con la información de toda la red vial.

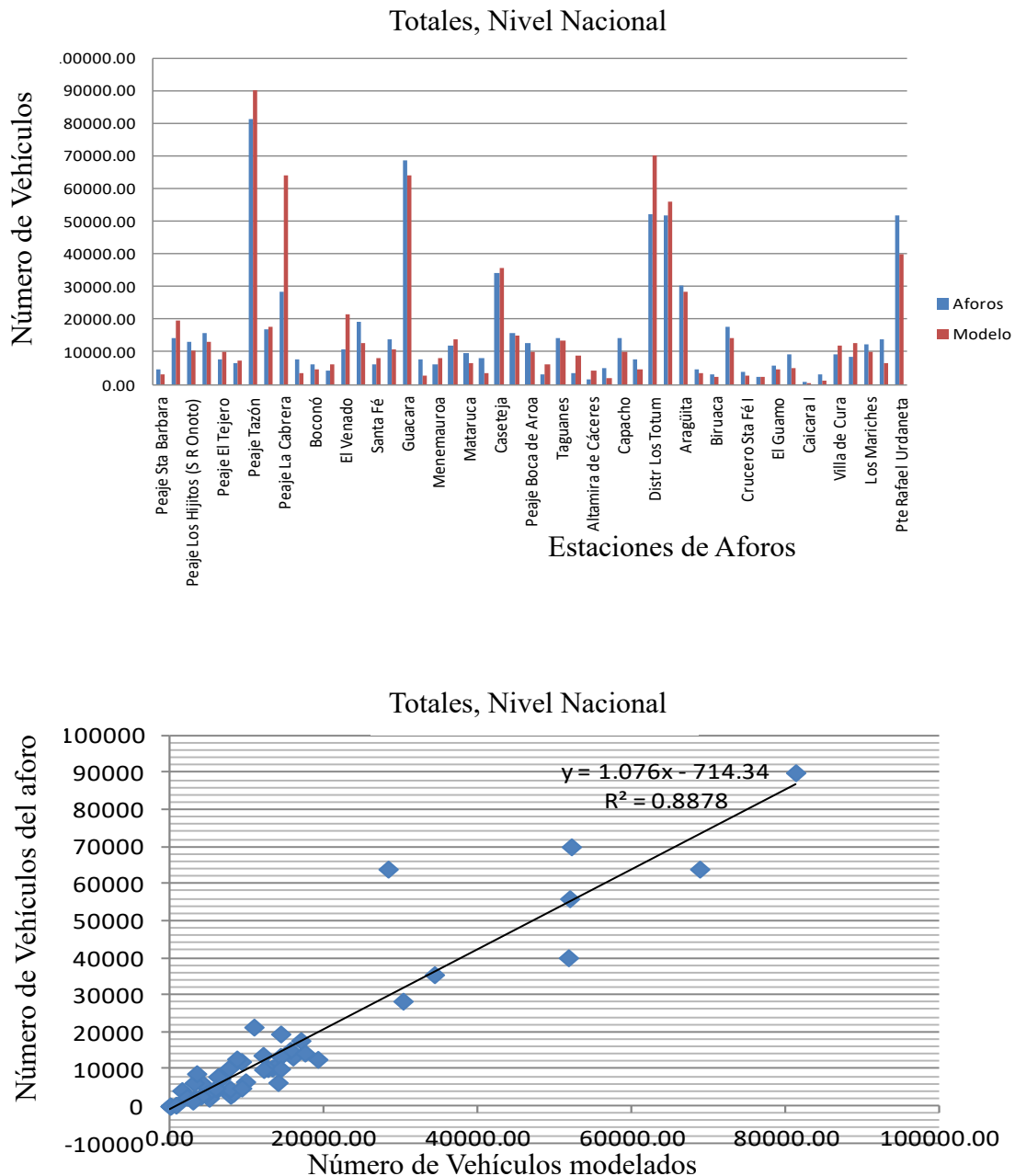


Figura 3. Resultados de la calibración del Modelo de Transporte

Fuente: Estudio Marco de Prospectiva Urbano Regional de Transporte para el proyecto Socialista Orinoco, Modelística, 2012

Como se puede observar, se logró una buena aproximación, de casi un 90% en la correlación de los valores del modelo con los de referencia, lo que da la certidumbre necesaria para establecer que el escenario base refleja la situación actual y seguir con el siguiente proceso que consiste en la proyección de los escenarios cuyas propuestas se desea analizar.

2.3 Construcción de escenarios futuros

Un supuesto importante en el Modelo de Simulación es que el crecimiento de la población y de las actividades socioeconómicas, se realiza de acuerdo a las proyecciones del Instituto de Estadísticas de Venezuela (2010) y de las proyecciones de la empresa Petróleos de Venezuela S.A. Los escenarios se elaboraron para un horizonte de 20 años, con resultados parciales cada 5 años. Así, se tienen escenarios para el 2017, 2022, 2027 y 2032.

En los escenarios futuros se codificaron las movilizaciones del transporte de productos petroleros en el país debido a la explotación de la Faja del Orinoco. Los subproductos de la explotación petrolera son el coque y el azufre. También se moviliza caliza. El petróleo se transporta por oleoductos y gasoductos los cuales se representaron en una red de transporte independiente.

La infraestructura en la zona de producción, que debió considerarse además de los pozos de extracción, consistió en la construcción de mejoradores y de refinerías cuya finalidad sería mejorar la calidad del crudo y hacer posible su transporte como producto líquido o gas. Para la construcción de los mismos se necesitarían los materiales siguientes: cemento, arena, piedra, acero y tubulares para la construcción de los pozos.

De acuerdo con el Plan Siembra Petrolera elaborado por Petróleos de Venezuela (2007), se construirían los mejoradores en Rabanito y Falconero (al sureste del país) y sobre la ribera del río Orinoco, así como la Refinería de Santa Rita, de acuerdo con la ubicación de los pozos de extracción de petróleo. La localización de los mejoradores y las refinerías se puede apreciar en la Figura 4.

También existió otra variante para el estudio por lo que se diseñaron dos grupos de escenarios. En el primer grupo se asumió que se construirán termoeléctricas en Rabanito, Falconero y Santa Rita (mismas ubicaciones que los mejorados y las refinerías), que consumirán prácticamente todo el coque que se produce en los mejoradores y refinería, pero que requieren de insumos de caliza para limpiar de óxido de azufre (SO₂) a la combustión del coque. Otro grupo de escenarios asumió que no se implantan las termoeléctricas, por lo que se haría necesario transportar las grandes cantidades de coque que se producirán en los mejoradores y refinería a puertos con destinos internacionales para su comercialización.

Para ambos grupos de escenarios se asumió la implantación de varios proyectos de transporte a ser evaluados, tales como:

- Carretera de Acceso Controlado

- Ferrocarril de la Faja Petrolífera del Orinoco para el transporte de materiales y pasajeros
- Operatividad de muelles y uso extensivo de los Ríos Orinoco y Apure

2.3.1 Escenarios con termoeléctricas

Para este grupo de escenarios se asumió que existe un crecimiento de la población de acuerdo a las proyecciones del Instituto de Estadísticas de Venezuela y que la red de transporte donde se movilizarán los productos y subproductos es la red actual carretera, fluvial y ferrocarrilera. Lo singular de estos escenarios es la construcción de las termoeléctricas, cuyos insumos principales son (1) el coque, un subproducto de los pozos de extracción y (2) la caliza que debe ser transportada desde minas naturales distribuidas a lo largo del territorio nacional.

2.3.2 Escenarios sin termoeléctricas

La diferencia con el escenario anterior es que en este escenario no se construyen las termoeléctricas que se alimentan del coque, que se genera de los mejoradores y refinerías. En este escenario se asume que no es necesario transportar las calizas, pero sí se presenta la necesidad de transportar el coque hacia los puertos internacionales para su comercialización. Las cantidades de carga y pasajeros a movilizarse en cada escenario se muestran en la Tabla 1 y Tabla 2.

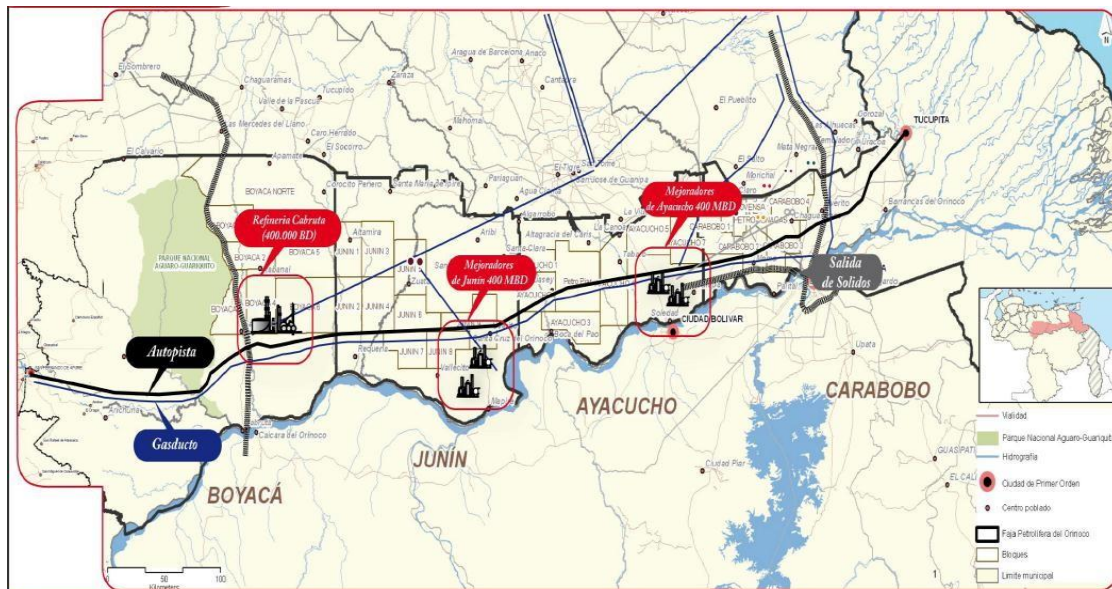


Figura 4. Localización de los mejoradores y la refinería

Fuente: Estudio Marco de Prospectiva Urbano Regional de Transporte Para el Proyecto Socialista Orinoco, Modelística, 2012

Tabla 1. Proyecciones de totales de pasajeros y carga diarios en escenarios sin termoeléctricas

| Sin Termoeléctricas | | | | | |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Categoría | 2012 | 2017 | 2022 | 2027 | 2032 |
| Pax Privado | 1,173,939 | 1,368,735 | 1,567,182 | 1,678,189 | 1,807,103 |
| Pax Público | 1,168,666 | 1,318,488 | 1,492,513 | 1,599,982 | 1,713,394 |
| Carga Liviana | 644,747 | 764,571 | 847,195 | 921,802 | 994,268 |
| Carga Pesada | 518,853 | 614,364 | 671,767 | 726,973 | 778,338 |
| Carga XPesada | 754,090 | 878,835 | 975,764 | 1,063,579 | 1,148,768 |
| Coque | - | 24,000 | 36,000 | 36,000 | 36,000 |
| Azufre | - | 3,200 | 4,800 | 4,800 | 4,800 |
| Cemento | - | 898 | 898 | 898 | 898 |
| Arena | - | 1,704 | 1,704 | 1,704 | 1,704 |
| Piedra | - | 2,360 | 2,360 | 2,360 | 2,360 |
| Acero | - | 526 | 526 | 526 | 526 |
| Caliza | - | 2 | 3 | 3 | 3 |
| Equipos | - | 9,286 | 11,734 | 14,326 | 18,285 |
| Total pax | 2,342,606 | 2,687,223 | 3,059,696 | 3,278,171 | 3,520,497 |
| Total carga | 1,917,690 | 2,299,746 | 2,552,750 | 2,772,970 | 2,985,950 |

Tabla 2. Proyecciones de totales de pasajeros y carga diarios en escenarios con termoeléctricas

| Con Termoeléctricas | | | | | |
|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Categoría | 2012 | 2017 | 2022 | 2027 | 2032 |
| Pax Privado | 1,173,939 | 1,368,735 | 1,567,182 | 1,678,189 | 1,807,103 |
| Pax Público | 1,168,666 | 1,318,488 | 1,492,513 | 1,599,982 | 1,713,394 |
| Carga Liviana | 644,747 | 764,571 | 847,195 | 921,802 | 994,268 |
| Carga Pesada | 518,853 | 614,364 | 671,767 | 726,973 | 778,338 |
| Carga XPesada | 754,090 | 878,835 | 975,764 | 1,063,579 | 1,148,768 |
| Coque | - | - | - | - | - |
| Azufre | - | 3,200 | 4,800 | 4,800 | 4,800 |
| Cemento | - | 898 | 898 | 898 | 898 |
| Arena | - | 1,704 | 1,704 | 1,704 | 1,704 |
| Piedra | - | 2,360 | 2,360 | 2,360 | 2,360 |
| Acero | - | 526 | 526 | 526 | 526 |
| Caliza | - | 970 | 2,910 | 2,910 | 2,910 |
| Equipos | - | 9,286 | 11,734 | 14,326 | 18,285 |
| Total pax | 2,342,606 | 2,687,223 | 3,059,696 | 3,278,171 | 3,520,497 |
| Total carga | 1,917,690 | 2,276,717 | 2,519,660 | 2,739,880 | 2,952,860 |

2.4 Resultados

El modelo diseñado fue totalmente multimodal y permitió la transferencia de mercancías y personas entre los modos terrestres (carreteras y ferrocarriles) y fluviales / marítimos (barcos, barcazas, etc.), siempre y cuando exista la infraestructura que lo permita.

En términos cuantitativos de pasajeros, los escenarios a comparar son exactamente iguales sin embargo, con relación a la carga en toneladas, el escenario sin termoeléctricas, movilizaría mayor cantidad de toneladas de carga que el escenario con termoeléctricas, lo cual se explica por la cantidad de coque que se debe movilizar a los puertos de exportación, esta situación solo puede valorarse bajo los indicadores económicos para definir cuál es el escenario propicio de seleccionar como la opción más conveniente.

Los costos tienen una influencia determinante en la selección del operador, los costos operativos de los operadores de transporte resultados del modelo se listan en la Tabla 3.

Los resultados entre los dos escenarios de la investigación fueron:

- Cuando no se construyen las termoeléctricas los viajes de carga son muy superiores a los del escenario alternativo, debido a las grandes cantidades de coque que se deben transportar hacia los puertos de comercialización internacional. Se concentra entre pocos orígenes y destinos, por lo que la actividad de carga es intensa en unos pocos itinerarios de viaje. En esas circunstancias, los viajes ocasionan deterioros considerables en la infraestructura, por lo que el escenario considerado para este trabajo, de una restringida inversión en mantenimiento vial y de nuevas vialidades, es insostenible.
- El escenario que simula la construcción de las termoeléctricas, asume el consumo total del coque por lo que los viajes de ese material no se consideran. Sin embargo, existen los viajes de las calizas que son considerablemente menos impactantes (menores cantidades a ser transportadas con respecto al coque) y son viajes más homogéneos en la red de transporte terrestre del país.

Tabla 3. Costos por distancia por operador (Dólares americanos)

| Operador | Costo USD/Km | Carga | USD/Km/Pasajero |
|-----------------------|--------------|-----------|-----------------|
| Automóvil | 0.4 | 2.44 pas | 0.16 |
| Autobús | 0.51 | 24.88 pas | 0.02 |
| Camión liviano | 0.55 | 6.08 Ton | 0.09 |
| Camión pesado | 0.92 | 14.76 Ton | 0.06 |
| Camión extra-pesado | 1.56 | 25.54 Ton | 0.06 |
| Ferrocarril pasajeros | 7.41 | 1,500 pas | 0.005 |
| Ferrocarril de carga | 3.68 | 2,000 Ton | 0.002 |
| Gabarra | 1.38 | 1,000 Ton | 0.001 |

- Como se puede apreciar en la Figura 5, los costos generalizados que calculó el modelo para el escenario sin termoeléctricas son superiores debido al número de viajes que significa movilizar principalmente los subproductos (coque y azufre). Sin embargo, esos costos disminuyen notablemente en la alternativa con termoeléctricas ya que en esos escenarios se considera que el coque se consume totalmente en las termoeléctricas.

Además del análisis de los costos generalizados, el modelo Transus también determinó los beneficios a los usuarios por escenario (Tabla 4). Puede verse que los escenarios con termoeléctricas generan beneficios considerablemente mayores. Dentro de los escenarios con termoeléctricas, el escenario del corredor fluvial es el que genera los mayores beneficios. Sin termoeléctricas es el escenario Carretera con Acceso Controlado el que genera los mayores beneficios.

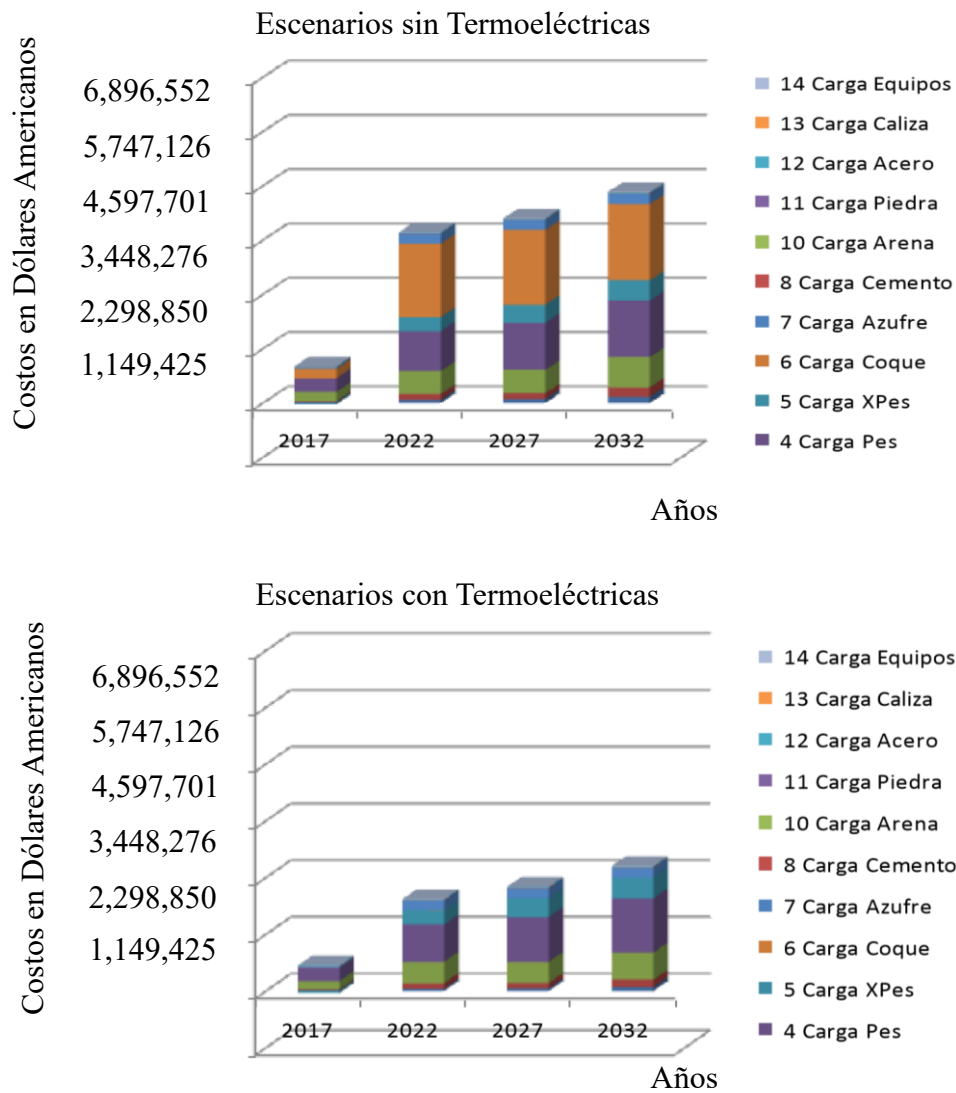


Figura 5. Costos generalizados del transporte de productos y subproductos

Fuente: Estudio Marco de Prospectiva Urbano Regional de Transporte Para el Proyecto Socialista Orinoco, Modelística, 2012

Tabla 4. Síntesis de los beneficios a los usuarios por escenario (Dólares americanos diarios)

| Situación | Escenario | 2017 | 2022 | 2027 | 2032 |
|----------------------------|--|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Con termoeléctricas | Ferrocarril Faja Petrolífera del Orinoco | 1,224,309 | 4,442,429 | 4,856,692 | 5,280,136 |
| | Carretera Acceso Controlado | 746,094 | 3,614,274 | 3,909,956 | 4,468,528 |
| | Corredor Fluvial | 424,495 | 5,688,857 | 5,853,353 | 6,197,332 |
| Sin termoeléctricas | Ferrocarril Faja Petrolífera del Orinoco | 158,214 | 1,381,927 | 1,521,114 | 1,628,317 |
| | Carretera Acceso Controlado | 470,474 | 1,855,204 | 2,105,841 | 2,527,270 |
| | Corredor Fluvial | 174,685 | 1,817,520 | 1,898,792 | 2,068,733 |

2.5 Discusión

Tranus provee los indicadores numéricos necesarios para que el analista realice un proceso de evaluación, ya sea económico o financiero. Los resultados e indicadores del modelo pueden ser introducidos automáticamente en una hoja de cálculo que el usuario puede organizar de la manera que le parezca más conveniente, pudiéndole agregar exógenamente otros elementos no provenientes de la simulación que sea preciso tomar en cuenta, como los factores de escala temporal de algunas de las variables, precios sombra, y, fundamentalmente, los costos de inversión de los proyectos que se pretende evaluar. Las tablas de evaluación pueden ser organizadas como series anuales, usualmente cubriendo períodos de evaluación de entre 20 y 30 años, siendo posible presentar las siguientes variables de evaluación:

- beneficios a los usuarios de transporte (por categoría)
- beneficios a los operadores de transporte
- beneficios a los administradores del transporte
- costos de capital
- ahorros energéticos
- otros costos o beneficios
- beneficios a los consumidores de suelo
- beneficios totales
- costos de capital descontados
- beneficios totales descontados
- saldos anuales descontados

Con base en estas series, y utilizando las funciones disponibles en hojas de cálculo, se pueden calcular los indicadores tradicionales de evaluación: relación beneficio/costo, tasa interna de

retorno y valor presente neto. En este artículo, no se extendió el análisis al cálculo de la TIR.

2.6 Conclusiones

Como resultado del estudio, el escenario de implantación de las plantas termoeléctricas resulta el más beneficioso. Su presencia tiene un impacto decisivo sobre la movilidad de la carga, al evitar las enormes movilizaciones de coque hasta puertos que permitan su exportación. Evitando también la necesidad de cuantiosas inversiones en la construcción de infraestructura de transporte (carreteras, ferrocarriles y puertos) necesarias sólo para transportar el coque. La construcción de las plantas termoeléctricas puede también derivar en otros beneficios como la seguridad energética del país.

AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Ulises Ramón Navarro Hernández, por su contribución en la revisión del artículo y al Dr. Tomás Rodrigo de la Barra Mac Donald, creador del Modelo Integral de transporte y usos de suelo Tranus.

REFERENCIAS

- DE LA BARRA, T.R. (2005). *Integrated Land Use and Transport*. Modelling 3ra Edición. Cambridge University Press.
- DE LA BARRA, T.R, AÑEZ, J.C Y PEREZ, B. (1999). *Revista Urbana*. Volumen 4 Número 25 ISBN 0798-0523. pp 67 – 84.
- INSTITUTO DE ESTADÍSTICAS DEL GOBIERNO BOLIVARIANO DE VENEZUELA, INE (2010). *Reportes del Censo 2010*.
- MODELÍSTICA (2012). *Estudio Marco de Prospectiva Urbano Regional de Transporte para el Proyecto Socialista Orinoco*. Venezuela.
- PETROLEOS DE VENEZUELA SA (2007). *Petróleos de Venezuela. Reportes del Proyecto Socialista Orinoco*.

30 Accidentalidad y logística del transporte de materiales y residuos peligrosos

María Guadalupe Saucedo Rojas

Ana Cecilia Cuevas Colunga

Jaime Guillermo Pérez Castro

Alberto Mendoza Díaz

Instituto Mexicano del Transporte, México

RESUMEN

En la cadena de suministro que mueve sustancias peligrosas, el manejo cuidadoso del producto obedece al valor que tiene la mercancía y a la incidencia que puede generar sobre la vida de las personas y sobre el ambiente, en caso de suscitarse una eventualidad. En este artículo se realiza un análisis de accidentalidad considerando a los vehículos que transportan materiales y residuos peligrosos por la Red Carretera Federal correspondiente al año 2014, así como también se hace una breve documentación del estado del arte de la logística para el transporte de dichos materiales. Además de lo anterior, se describe la reglamentación que existe en México para el transporte de materiales y residuos peligrosos, así como cifras que muestran el porcentaje de vehículos del total del parque vehicular registrado en México que transporta estos tipos de materiales, dentro de lo que destaca que para el año 2014, el 11.48% del parque vehicular del autotransporte de carga, corresponde a autotransporte de carga especializada de materiales peligrosos es decir, un porcentaje nada despreciable se encuentra circulando por las carreteras diariamente. Dentro de los principales resultados obtenidos destaca como, en función de los datos de la carga, los vehículos doble articulados involucrados en accidentes representan un porcentaje superior (23.9 %) que cuando transportan carga en general (14.4%), este dato conlleva a poner más atención en el empleo de este tipo de vehículos para el transporte de materiales y residuos peligrosos.

Palabras clave: accidentalidad, logística, políticas de transporte, materiales peligrosos.

1. INTRODUCCION

El transporte eficaz y eficiente de materiales y residuos es esencial para la viabilidad económica mundial. Muchos de estos materiales y residuos pueden ser peligrosos y su manejo exige cumplir las correspondientes normas y reglamentos. De acuerdo con el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (SCT, 2012a), se entiende por material peligroso, aquellas sustancias peligrosas, sus remanentes, sus envases, embalajes y demás componentes que conformen la carga que será transportada por las unidades, y por residuos peligrosos, aquéllos que posean alguna de las características de

corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad, o que contengan agentes infecciosos que les confieran peligrosidad, así como envases, recipientes, embalajes y suelos que hayan sido contaminados cuando se transfieran a otro sitio; es decir se estaría hablando de sustancias o materiales que son capaces de constituir un riesgo importante para la salud, los bienes o el ambiente. Éstos incluyen sustancias peligrosas, desechos peligrosos, contaminantes marinos, entre otros, y se clasifican de acuerdo con el Reglamento como pertenecientes a una de las nueve clases de peligro que se muestran en la Tabla 1, clasificación que es parecida a la emitida por la Organización de las Naciones Unidas (ONU). La diferencia de esta cadena con otras es que el manejo cuidadoso del producto no obedece sólo al valor que la mercancía pueda tener, sino a la incidencia que puede generar sobre la vida de las personas y el ambiente, en caso de suscitarse una eventualidad.

Los objetivos del presente artículo son:

- Identificar la reglamentación que se debe cumplir en México para el transporte de materiales y residuos peligrosos.
- Obtener cifras del parque vehicular del autotransporte de carga en México que corresponde a vehículos asignados para el transporte de materiales y residuos peligrosos.
- Realizar un análisis de accidentalidad con base en los registros correspondientes al año 2014, que permita obtener cifras de los vehículos que transitan por la Red Carretera Federal (de alrededor de 48 mil km de longitud) que transportan materiales y residuos peligrosos y que se vieron involucrados en accidentes. A partir de los resultados obtenidos, determinar si es necesario proponer mejoras, por ejemplo, en la normativa, o en algún lineamiento de obligatorio cumplimiento, para incrementar la seguridad vial del país.
- Contar con conocimientos básicos de la logística para el transporte de materiales y residuos peligrosos a partir de un breve estudio del estado del arte de dicha logística.
- Enumerar algunas tecnologías que se pueden utilizar para mejorar la seguridad del transporte de materiales peligrosos.

2. REGLAMENTACIÓN

Desde años atrás han sido introducidas regulaciones cuyos objetivos fundamentales son: (1) proporcionar seguridad para los trabajadores y el público, (2) proteger la propiedad y el ambiente, (3) minimizar el costo para el público, la industria y el gobierno, y (4) minimizar los disturbios económicos y sociales.

Tabla 1. Clasificación de las sustancias peligrosas

| Clase | Denominación |
|--------------|---|
| 1 | Explosivos |
| 1.1 | Sustancias y objetos que representan un riesgo de explosión de la totalidad de la masa |
| 1.2 | Sustancias y objetos que representan un riesgo de proyección pero no un riesgo de explosión |
| 1.3 | Sustancias y objetos que representan un riesgo de incendio, pero no riesgo de explosión |
| 1.4 | Sustancias y objetos que no representan un riesgo considerable |
| 1.5 | Sustancias muy poco sensibles que presentan un riesgo de explosión de la totalidad de la masa |
| 1.6 | Objetos extremadamente insensibles que no presentan un riesgo de explosión a toda la masa |
| 2 | Gases comprimidos, refrigerados, licuados o disueltos a presión |
| 2.1 | Gases inflamables |
| 2.2 | Gases no inflamables, no tóxicos |
| 2.3 | Gases tóxicos |
| 3 | Líquidos inflamables |
| 4 | Sólidos inflamables |
| 4.1 | Sólidos inflamables |
| 4.2 | Sustancias que presentan un riesgo de combustión espontánea |
| 4.3 | Sustancias que en contacto con el agua desprenden gases inflamables |
| 5 | Oxidantes y peróxidos orgánicos |
| 5.1 | Sustancias oxidantes |
| 5.2 | Peróxidos orgánicos |
| 6 | Tóxicos agudos (venenos) y agentes infecciosos |
| 6.1 | Tóxicos agudos (venenos) |
| 6.2 | Agentes infecciosos |
| 7 | Radiactivos |
| 8 | Corrosivos |
| 9 | Varios |

La base para muchos reglamentos internacionales, nacionales y regionales se originó con las recomendaciones de la ONU sobre el transporte de materiales y residuos peligrosos, publicado por primera vez en 1957, cuya última revisión publicada entró en vigor en el año 2013. Este documento incluye un sistema integral de clasificación basado en criterios para las sustancias y la definición de las distintas clases, las normas para el envase y embalaje de materiales peligrosos, un sistema de comunicación de los peligros de las sustancias en transporte que cubre el etiquetado y marcado de los paquetes, rotulación de los tanques y unidades de carga, y la documentación de expedición e información de respuesta de

emergencia que se requiere para acompañar cada envío. Actualmente, estas recomendaciones están siendo reordenadas como "Reglamento Modelo".

A la hora de revisar o elaborar los reglamentos se espera que los gobiernos, las organizaciones intergubernamentales y demás organismos internacionales, los adapten a los principios enunciados en las recomendaciones de la ONU, contribuyendo así al logro de la uniformidad en este orden de cosas en todo el mundo. Una de las necesidades que se tiene para mantener un criterio uniforme en la reglamentación para el manejo de los productos peligrosos, es el uso de cadenas de suministro así como el uso de sistemas de transporte, que en caso de no contar con una homologación de las formas de empaque, embalaje, etiquetado, manejo, carga y descarga e incluso terminología, crearía dificultades a los exportadores o importadores, en el país de destino o en el país de origen, e incluso en países o estados por los que crucen las mercancías en tránsito.

Las labores de inspección y vigilancia tomarían más tiempo, por lo que el tener una regulación con un criterio uniforme no sólo traería como consecuencia una facilidad en el trabajo que se desarrolla en las zonas de inspección y vigilancia, sino que también agilizaría los flujos de las cargas por la reducción del tiempo de inspección; esto le permitiría al prestador de servicio o transportista, el ofrecer un servicio más rápido, más barato y de mejor calidad. La reglamentación afecta tanto a los directamente involucrados en el transporte como a los fabricantes de elementos y materiales relacionados con el transporte, embalaje y manipulación de materiales y residuos peligrosos.

La reglamentación principal en México es la siguiente: Norma Oficial Mexicana NOM-002-SCT/2011 "Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados", elaborada con base en la citada regulación de la ONU; NOM-011-SCT2/2012 "Condiciones para el transporte de las sustancias y materiales peligrosos envasadas y/o embaladas en cantidades limitadas"; NOM-012-SCT-2-2014 "Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal"; NOM-019-SCT2/2004 "Disposiciones generales para la limpieza y control de remanentes de sustancias y residuos peligrosos en las unidades que transportan materiales y residuos peligrosos"; NOM-020-SCT2-2004 "Requerimientos generales para el diseño y construcción de autotanques destinados al transporte de materiales y residuos peligrosos"; NOM-021-SCT2-1994 "Disposiciones generales para transportar otro tipo de bienes diferentes a las sustancias, materiales y residuos peligrosos, en unidades destinadas al traslado de materiales y residuos peligrosos" y el Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos. Este último presenta disposiciones generales, especificaciones para el envase y embalaje, características, especificaciones y equipamiento de los vehículos motrices y unidades de arrastre a utilizar, así como las condiciones de seguridad, especificaciones acerca del tránsito en vías de jurisdicción federal, disposiciones especiales para el transporte de residuos peligrosos, responsabilidad de los involucrados en la logística y cadena de suministro, obligaciones específicas de cada uno de

los involucrados y sanciones.

Es importante que todos los involucrados en el transporte de materiales y residuos peligrosos desde el expedidor, el transportista hasta el destinatario, tengan conocimiento de las normas y reglamentos vigentes y se mantengan en constante capacitación sobre la normativa, ya que por ejemplo durante 2013, la Policía Federal reportó un total de 1,120 infracciones levantadas por incumplir diferentes artículos del Reglamento, de los cuales el Artículo 52 referente a la documentación (ANIQ, 2014) fue el más infringido. En la Tabla 2, se enlista el número de infracciones más comunes en el año de estudio.

3. TRANSPORTE DE MATERIALES Y RESIDUOS PELIGROSOS

Los modos de transporte por los que se mueven los materiales y residuos peligrosos en México son: el marítimo, el ferroviario, aéreo y el carretero. Sin embargo, el modo más utilizado en el país es el carretero. Obtener información acerca de las toneladas que se mueven de materiales y residuos peligrosos en México es algo difícil, ya que generalmente es considerada confidencial. La Estadística Básica de Autotransporte Federal (SCT, 2014) registró para el año 2014 que el 11.48% del parque vehicular del autotransporte de carga, corresponde a autotransporte de carga especializada de materiales peligrosos, porcentaje que respecto al 2013 muestra un ligero incremento del 0.08%. Dentro de dicha Estadística (SCT, 2014) se contabilizan todas las unidades registradas, aun cuando algunas ya no se encuentran en uso debido a su antigüedad, sin embargo, es una de las principales fuentes de dominio público para tener información sobre el tema.

Tabla 2. Infracciones al Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, 2014

| Artículo | Referido a: | Número de infracciones |
|----------|--|------------------------|
| 52 | Documentación | 399 |
| 5 | Permiso para el Transporte de Materiales y Residuos Peligrosos | 266 |
| 41 | Inspecciones periódicas técnicas | 93 |
| 118 | Acondicionamiento de la carga | 54 |
| 58 | Transportar personas no relacionadas con el transporte | 50 |
| 119 | Obligaciones del autotransportista | 39 |
| 60 | Realizar paradas no permitidas | 38 |
| 6 | Transportar otro: personas, animales u otros bienes diferentes a los que tiene permiso | 34 |
| 120 | Obligaciones del conductor | 28 |
| 114 | Obligaciones del expedidor | 22 |

Por otra parte, se tiene registro de que el 78% de las unidades registradas para carga especializada corresponde a materiales peligrosos, lo cual permite suponer que de la cifra que proporciona Autotransporte Federal relacionada con la demanda atendida en miles de toneladas por el autotransporte de carga especializada, al menos el 78% está relacionada con materiales peligrosos, es decir, se movieron 50,260,860 toneladas, lo cual representó un 9.83% del total de la carga que se transportó en México por carretera para el año 2014.

El equipo utilizado para el transporte de estas sustancias debe cumplir con ciertas especificaciones, tal como lo indica el artículo 33 del Reglamento, el cual establece que: “Toda unidad motriz que sea utilizada para el traslado de materiales y residuos peligrosos deberá cumplir con las especificaciones adicionales establecidas en las normas correspondientes”; el tipo de vehículo que se utilizará será el más adecuado de acuerdo con las características del tipo del producto a transportar, con la finalidad de facilitar su manejo, ofrecer la protección que el producto requiere (ya sea en su envase o en su embalaje) con el fin de evitar su daño, mantener la estabilidad del producto para evitar su posible reacción, entre otras cosas. El total de toneladas transportadas por clase de vehículos para el autotransporte de carga especializada es como sigue: el tractocamión de tres ejes T-3, con aproximadamente el 80% del total, seguido del camión de dos ejes C-2 con el 12%, después el camión de tres ejes C-3 con el 8% y finalmente el tractocamión de dos ejes T-2 con el 0.5%. De acuerdo con información de un estudio realizado en 2005 para el transporte de materiales peligrosos en México (Mendoza y Rodríguez, 2005), los equipos principalmente utilizados para el transporte de materiales y residuos peligrosos son el tractocamión con semirremolque T3-S2, seguido del T3-S3, y posteriormente, aunque en una menor proporción del total de toneladas transportadas, el C-2 y C-3. Estos datos se establecen como preliminares y fueron obtenidos de información disponible al público en general.

4. ANÁLISIS DE ACCIDENTALIDAD

Para efectuar el análisis de accidentalidad se usó la base de datos correspondiente al año 2014 proporcionada por la Policía Federal al Instituto Mexicano del Transporte, la cual contiene información sobre los accidentes acontecidos en 2014 en la Red Carretera Federal vigilada por dicha institución. Cabe aclarar que esta red comprende en su mayoría, caminos de jurisdicción federal, aunque no necesariamente la red dentro de dicha jurisdicción es vigilada por la Policía Federal.

Las bases de datos registran un campo en el que se especifica el contenido de los vehículos que se vieron involucrados en un accidente, a partir de dicho contenido se realizó la selección de los vehículos que transportaron materiales y residuos peligrosos, para lo cual se hizo uso de la clasificación de las sustancias peligrosas que se encuentra dentro del Título Primero en su Capítulo I del Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos (SCT, 2012a), del “Listado de Sustancias y Materiales Peligrosos más Usualmente Transportados” que se encuentra en la NOM-002-SCT/2011 (SCT, 2012b), así

como de la Guía de respuesta en caso de emergencia del 2012 (Cloutier y Cushmac, 2012). Dado que la base de datos es obtenida del parte de accidente, cada persona que levanta dicho parte asigna un nombre al contenido de la carga que no necesariamente corresponde con el nombre oficial, por tanto, en algunos casos fue necesario buscar algunos nombres de los contenidos haciendo uso de buscadores de internet para determinar específicamente de qué se trataba y verificar si correspondía a un material o residuo peligroso.

Para 2014 se cuenta con una base de datos de 18,007 siniestros que dejaron un saldo de 3,784 personas muertas, 17,502 lesionadas y en los que participaron 28,330 vehículos. Se contabilizaron 6,205 vehículos de carga, 5,239 camionetas “pick up” y 41 ferrocarriles. Sólo se tienen los datos que especifican la mercancía transportada para 3,994 vehículos (véase Tabla 3), sin embargo, este valor varía considerablemente según el tipo de vehículo, por ejemplo, para los vehículos articulados sencillos y dobles se especifica la carga para más del 70% mientras que, para el camión unitario sólo se tiene información del 49%.

En total se tienen registrados 471 vehículos siniestrados durante 2014 y cargados con Materiales Peligrosos (MP). La Figura 1 muestra en forma gráfica los datos de los 435 vehículos de carga más representativos y se puede observar que el 13.4% de los doblemente articulados transportaban materiales peligrosos, este valor es de 8.1% para los articulados sencillos y de 5.1% para el camión unitario. Ahora bien, si se analizan los datos en función de la carga (véase Figura 2) se puede observar que el 41.6% de los vehículos siniestrados y cargados con material peligroso fueron camiones unitarios, el 34.5% articulado sencillo y 23.9% articulado doble, mientras que para los vehículos con carga general esta distribución es de 49.4%, 36.1% y 14.4%, respectivamente.

Tabla 3. Descripción de vehículos transportando materiales peligrosos siniestrados durante 2014

| Tipo de vehículo | Total de vehículos | Vehículos con datos de la mercancía transportada | Vehículos transportando MP | % Vehículos cargado con MP respecto al total |
|-------------------------|---------------------------|---|-----------------------------------|---|
| Articulado | 1,857 | 1,301 | 150 | 8.1 |
| Camión unitario | 3,574 | 1,756 | 181 | 5.1 |
| Doble articulados | 774 | 564 | 104 | 13.4 |
| Ferrocarril | 41 | 16 | 3 | 7.3 |
| “Pick up” | 5,239 | 357 | 33 | 0.6 |
| Total | 11,485 | 3,994 | 471 | 4.1 |

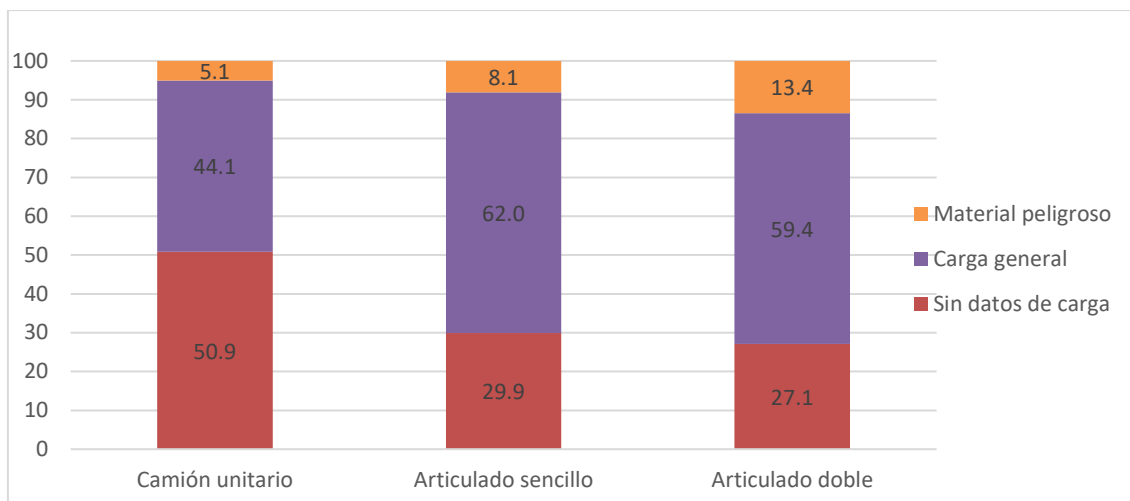


Figura 1. Datos de la carga por tipo de vehículo

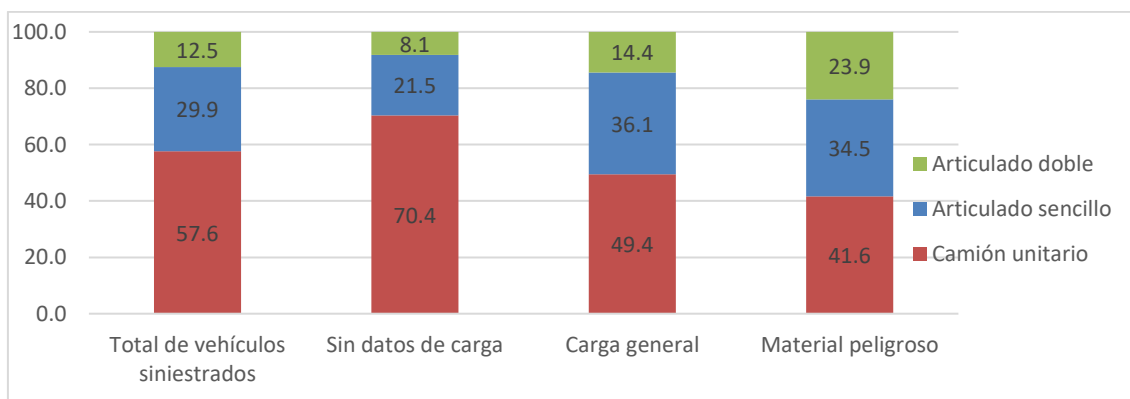


Figura 2. Datos de la carga por tipo de vehículo

Tabla 4. Saldos del total de siniestros de 2014 y de los que involucraron vehículos que transportaban material peligroso

| Saldos 2014 | Total de siniestros | Siniestros de vehículos transportando MP | % |
|---------------------------------|---------------------|--|-----|
| Colisiones | 18,007 | 466 | 2.6 |
| Muertos | 3,784 | 82 | 2.2 |
| Lesionados | 17,502 | 252 | 1.4 |
| Daños materiales (millones MNX) | 1,170,149,246 | 86,557,200 | 7.4 |

Los 471 vehículos siniestrados durante 2014 y cargados con material peligroso estuvieron involucrados en 466 colisiones, es decir que en cinco accidentes participaron dos vehículos; estos eventos dejaron un saldo de 82 fallecidas y 252 lesionadas, con daños materiales que superan los 86 millones de pesos. En la Tabla 4 puede observarse que los accidentes de vehículos con transporte de materiales peligrosos representaron el 2.6% de la totalidad, concentrando el 7.4% de los daños materiales, mientras que respecto a las víctimas, estos porcentajes son de 2.2% y 1.4% para los muertos y lesionados, respectivamente.

Así finalmente, de los resultados más relevantes obtenidos se destaca como, en función de los datos de la carga, los vehículos doble articulados involucrados en accidentes muestran porcentajes superiores que cuando se transporta carga en general (esto es un 23.9 % en comparación con un 14.4%), lo cual indica la necesidad de poner especial atención en este tipo de transporte y aún más si carga materiales y residuos peligrosos, ya que en caso de siniestros se tendrán accidentes más severos. Es necesario no perder de vista las cifras de accidentalidad, ya que éstas pueden ayudar a proponer mejoras en las normativas o inclusive ser más estrictos para su cumplimiento de manera que se logre reducir la frecuencia y severidad de los accidentes. A futuro se puede hacer una comparativa con años anteriores para ver cómo ha sido la tendencia de este tipo de accidentes, aunque de acuerdo con un estudio realizado con anterioridad (Mendoza et al., 2012), se sabe que los accidentes de vehículos con transporte de materiales peligrosos representaron el 0.82% de la totalidad para 2006, 0.83% para 2007, 1.05% para 2008, 1.30% para 2009 y en los resultados actualmente obtenidos 2.6% para 2014, es decir, pasó a ser el doble en un periodo de 5 años (2009-2014), lo cual requiere atención, ya que es mejor considerar y proponer medidas preventivas antes de que se tengan que aplicar correctivas, si dicho porcentaje sigue creciendo.

5. LOGÍSTICA PARA EL TRANSPORTE DE MATERIALES PELIGROSOS

Para cuestiones de logística del transporte de materiales peligrosos, al tratarse de productos tan sensibles, es importante establecer trabajos preventivos del tipo de evaluación de riesgos y además, definir un adecuado entrenamiento para las personas que manejan directamente estos materiales. En esta cadena de suministro lo primordial es promover una cultura de seguridad que debe permear en todos y cada uno de los involucrados.

En respuesta a la normativa y las buenas prácticas empresariales, expedidores y transportistas han implementado técnicas para evaluar el riesgo asociado con el transporte de materiales peligrosos, así como para minimizar estos riesgos en la selección de ruta y la programación de vehículos (Hancock, 2001). Como resultado de esto, se han producido avances importantes en métodos para realizar estas evaluaciones en los últimos decenios.

Las decisiones sobre el movimiento de materiales peligrosos involucran muchas partes interesadas o interesados. Por lo tanto, las herramientas y modelos para proporcionar un aporte a estas decisiones van desde los que minimizan (o maximizan) un sólo objetivo a los que encuentran la "mejor" solución entre varios objetivos, a menudo en competencia. Los datos utilizados para estas decisiones van desde los que son deterministas, donde los valores son conocidos o medibles, hasta los estocásticos, donde la incertidumbre de los valores se incluye directamente en el proceso de toma de decisiones.

5.1 Evaluación de riesgos

La evaluación del riesgo se puede definir como un proceso dinámico para la comprensión de los riesgos. El primer paso en la gestión del transporte de materiales peligrosos es, por lo

tanto, la comprensión de los riesgos asociados a ello. Este proceso ha tomado varias formas basadas en las necesidades y los recursos disponibles, la utilización de medidas sencillas como indicadores de riesgo y las medidas directas de las consecuencias, para la construcción de índices que luego se utilizan como medidas comparativas.

Una evaluación de riesgos completa para la comunidad del transporte y público en general, no es algo que resulte muy sencillo de realizar, ya que muchos factores deben ser considerados como: el tipo y la cantidad de material, tipo y cantidad de embalaje, la manipulación y el transporte, el tipo de infraestructura sobre la cual el material peligroso está siendo transportado, estimación del número de envíos, entre otros; si son considerados únicamente algunos factores, se contaría sólo con información parcial sobre los riesgos inherentes al transporte de materiales peligrosos. Es por ello que se requiere de evaluaciones más detalladas; muchas técnicas analíticas han estado desarrollándose, e incluso están siendo utilizadas por la industria de la energía nuclear (Hancock, 2001).

Actualmente existen diversos métodos analíticos implementados para la evaluación de riesgos, como es el caso de la construcción de perfiles de riesgo, el “Árbol de Falla” y el más comúnmente reconocido el “Marco de Tres Etapas”, el cual se muestra en la Ecuación 1:

$$R = P1 \times P2 \times P3 \quad (1)$$

donde: R es la medición del riesgo a lo largo de un segmento de transporte, P1 es la probabilidad de un evento no deseado (accidente), P2 es la probabilidad de liberación (fuga o escape del material) dado que un evento ha ocurrido, y P3 es la estimación de la magnitud de las consecuencias dado que una liberación ha ocurrido.

Cada componente de la Ecuación 1 produce una o más distribuciones de probabilidad, con dos de las tres siendo distribuciones condicionales. La distribución resultante proporciona una estimación de riesgo para un determinado tipo y cantidad de material (inherente en P3). Cuando R se combina con el número de la población de los alrededores y/o la naturaleza y el área del ambiente expuesta, se obtiene una determinación del riesgo. Esta determinación incluye medidas como la predicción del número de víctimas mortales, número de lesionados, instalaciones afectadas y el tipo y cantidad de daño a un área impactada.

Las estimaciones de accidentes en general o los índices de accidentes están disponibles en la literatura. Sin embargo, las estimaciones de las tasas de accidentes que involucran materiales peligrosos, probabilidades de liberación y las estimaciones de las consecuencias resultantes, por lo general no están disponibles para respaldar estimaciones detalladas, salvo cuando se han realizado estudios enfocados en ello. Del mismo modo, al utilizar datos de accidentes, existen tres dificultades principales en la creación de estimaciones específicas:

- 1) La selección de los datos del conjunto de accidentes reportados que representan eventos

relevantes;

- 2) Determinar una medida adecuada de la exposición que sea consistente con el problema que se aborda; y
- 3) El reconocimiento de la incertidumbre en las estimaciones como resultado de un pequeño número de accidentes reportados en categorías específicas.

5.2 Ruta

Para el transporte de materiales peligrosos, el nivel de riesgo puede ser gestionado haciendo una adecuada ruta y tomando decisiones de programación apropiadas. Las técnicas para la ruta y programación de los vehículos se han desarrollado con métodos mejorados para minimizar las medidas de riesgo y determinar las compensaciones entre el riesgo y otras medidas de desempeño del sistema (Hancock, 2001).

El más simple algoritmo de ruta resuelve el clásico "costo" mínimo para el problema de ruta. Este procedimiento encuentra la ruta desde un origen a un destino que tiene una mínima (o, en algunas aplicaciones, máxima) medida o "costo". Esta medida debe ser aditiva a través de enlaces, o segmentos, de la ruta. La adaptación de este procedimiento a la ruta de materiales peligrosos ha tradicionalmente minimizado una sola métrica definida por el usuario, tal como el tiempo de viaje o la probabilidad de accidentes. Otra métrica común de riesgo ha sido la exposición, que generalmente se define como la población adyacente dentro de algún ancho de banda prescrito multiplicado por la longitud del enlace. Estos riesgos basados en los enlaces se suman para determinar el riesgo global para cada ruta, y se selecciona la ruta con el riesgo total más bajo. Como nota de precaución, la mayoría de rutas optimizadas que minimizan la exposición dan lugar a muchos más largos y tortuosos viajes con mayores probabilidades de accidentes a causa de esta trayectoria.

Debido a que el uso de una sola medida de riesgo para los modelos de materiales peligrosos no representa las necesidades de la competencia de reducción del riesgo (generalmente minimizando la exposición) y optimización de costo (por lo general minimizando la distancia) múltiples formulaciones objetivas han sido desarrolladas. Cuando esto ocurre, el concepto de una solución óptima se sustituye con el de una solución eficiente. El primer esfuerzo para incluir explícitamente objetivos múltiples se realizó por Shrobrys (Hancock, 2001) y otros en la década de 1980. Shrobrys utiliza diferentes ponderaciones para combinar dos objetivos, la distancia (costo) y la exposición de la población (riesgo) para obtener varias soluciones que representan explícitamente compensaciones entre diferentes objetivos. Un ejemplo de los resultados obtenidos al aplicar este enfoque, nos indica que conforme el costo aumenta el riesgo disminuye y viceversa, conforme el costo disminuye el riesgo aumenta. Éste y otros primeros modelos multi-objetivo se basan, explícita o implícitamente, en la identificación de algún sistema de ponderación para hacer los múltiples objetivos evaluables. Una limitación de este enfoque es que sólo un subconjunto de las posibles rutas es identificado, proporcionando un conjunto parcial de soluciones.

En contraste con el sistema de ponderación está el método de restricción, el cual reduce el problema a un sólo objetivo mediante la conversión de todos menos uno de los objetivos en restricciones. A cada enlace se asigna un vector "costo" que caracteriza a ese enlace en términos de criterios restrictivos. Estas restricciones proporcionan límites sobre el vector de costos convertido. El tomador de decisiones examina diferentes escenarios de ruta cambiando los niveles de logro de objetivos y la prioridad para su logro, teniendo así una gran flexibilidad. Sin embargo, ésta es también su mayor limitación ya que las soluciones inferiores se pueden seleccionar si los niveles de logro de metas se encuentran dentro de la curva que los define.

Cuando varios envíos son necesarios, una sola población o región puede estar en mayor riesgo si todos los envíos son transportados por la misma ruta. Por lo tanto, se ha considerado la equidad de riesgo, o propagar el riesgo a través de múltiples caminos. Sin embargo, el conjunto de caminos que distribuye más equitativamente el riesgo puede ser más peligroso en general que una única ruta con varios envíos.

5.3 Ruta y programación

La inclusión de la programación en las decisiones de ruta se considera importante en la gestión de riesgo debido a que las estimaciones de riesgo dependen de los parámetros que son dependientes de la hora del día. Por ejemplo, las tasas de accidentes varían según las condiciones de luz y la congestión, que a su vez dependen de la hora del día y el día de la semana. La dependencia de la hora del día de los atributos de los segmentos implica que las decisiones de programación deben hacerse en conjunto con las decisiones de ruta y que las decisiones de gestión deben incluir esta combinación de forma explícita.

La investigación actual se está centrando en el desarrollo de algoritmos que incorporan atributos del segmento de red que varían con el tiempo en el proceso de optimización. Sulijoadikusumo y Nozick (Hancock, 2001) proponen una aproximación para encontrar el conjunto de soluciones no dominadas de un origen dado a un destino dado cuando la espera en la red está prohibida y la hora de salida es dada. Miller-Ganchos y Mahmassani (Hancock, 2001) asumen que tanto tiempo de viaje y medidas de riesgo no son constantes en el tiempo y no se conocen con certeza, y por lo tanto se incorporan en el procedimiento de solución como variables aleatorias con funciones de distribución de probabilidad que varían con el tiempo. La incorporación de los cambios en los horarios de salida del viaje puede reducir algunas de las medidas de riesgo de selección de ruta en órdenes de magnitud, lo que justifica el aumento del costo y esfuerzo.

6. GESTIÓN DE RIESGOS

La gestión del riesgo se ha definido como la aplicación sistemática de políticas, prácticas y recursos a la evaluación y control de riesgos que afectan a la salud humana y la seguridad y el medio ambiente. Peligro, riesgo y análisis beneficio/costo son utilizados para apoyar el

desarrollo de: opciones de reducción de riesgos, los objetivos del programa, y priorización de problemas y recursos.

Muchas responsabilidades asociadas con el transporte de materiales peligrosos han sido puestas por la jurisdicción de los gobiernos, éstas incluyen:

1) Preparación de la comunidad y la respuesta de emergencia, 2) Evaluación de riesgos y comunicación, 3) Ruta y las consideraciones registradas, 4) La recopilación de datos y gestión de la información, 5) Inspección y aplicación.

Como parte de esto, los organismos normativos han utilizado técnicas de gestión de riesgos para establecer rutas designadas para el uso del vehículo o, en áreas limitadas, rutas de exclusión que prohíben los vehículos que transportan materiales peligrosos. En algunos casos, esos organismos han establecido restricciones de tiempo del día, así como de carril.

La Guía de respuesta en caso de emergencia del 2012 (Cloutier, 2012) es una guía que deben tener en cuenta principalmente los que responden primero en la fase inicial de un incidente ocasionado por el transporte de materiales peligrosos. Los organismos que se encargan en México de acudir en caso de emergencias ante un accidente o percance que involucre el transporte de materiales y residuos peligrosos son: bomberos, protección civil, personal de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), de la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), entre otros, organismos cuyo personal debe estar altamente capacitado para responder ante una situación de emergencia de este tipo.

Dentro de la gestión de riesgos es muy importante desde el ámbito de la Seguridad Vial, las condiciones de seguridad que establece el Reglamento (SCT, 2012a) referente a: a) La inspección de las unidades de transporte, b) El acondicionamiento de la carga y c) La documentación, destacando dentro de ésta principalmente la importancia de que durante el traslado de sustancias, materiales o residuos peligrosos es obligatorio que la unidad de transporte cuente con póliza de seguro individual o en conjunto del transportista y del expedidor de la sustancia, material o residuo peligroso. Por otra parte, también es importante que los transportistas, expedidores o generadores de los materiales o residuos peligrosos, contraten un seguro que ampare los daños que puedan ocasionarse a terceros en sus bienes y personas, ambiente, vías generales de comunicación y cualquier otro daño que pudiera generarse por la carga en caso de accidente de conformidad con la normatividad respectiva. El seguro contratado debe amparar el traslado de la carga desde el momento en que sale de las instalaciones ya sean del usuario, expedidor y/o generador hasta que se recibe en las instalaciones señaladas como destino final.

Otra cuestión importante que menciona el Reglamento es que los seguros a que se refiere no limitan la responsabilidad ya sea del transportista, expedidor, generador y/o destinatario del material o residuo peligroso. El Reglamento vigente ha registrado avances importantes, ya

que anteriormente, las pólizas del seguro las pagaba directamente el transportista, es decir no existía una corresponsabilidad entre las partes, estas modificaciones al reglamento entraron en vigor en el 2013 y refuerzan las medidas de seguridad.

7. TECNOLOGÍA

Los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) incluyen tecnologías avanzadas que se pueden utilizar para mejorar la seguridad del transporte de materiales peligrosos, incluyendo los sistemas de información de control del vehículo y del conductor, sistemas de detección de vehículos pesados, sistemas de monitoreo del desempeño del conductor y vehículo. Si bien no se utilizan específicamente para evaluar los riesgos o determinar rutas, estas tecnologías pueden proporcionar información para aumentar la seguridad del transporte de materiales peligrosos.

Los sistemas de control de vehículos ayudan a los conductores a través del seguimiento de vehículos circundantes, dándole notificaciones al conductor de las condiciones inseguras para ayudar en la prevención de accidentes. Cuando estos sistemas operan, se proporcionan técnicas para reducir los accidentes. Los sistemas de información del conductor mejoran la calidad y proporcionan en tiempo real información del tráfico y de la disponibilidad de la ruta, información que puede ser proporcionada tanto a los conductores como a los expedidores.

Tecnologías de Localización Automática de Vehículos (AVL) proporcionan información en tiempo real sobre la ubicación del equipo. En cualquier momento, la oficina de expedición tiene la capacidad de localizar vehículos geográficamente, que en combinación con los sistemas de información del conductor puede ser utilizado de apoyo en el camino para la selección de la ruta.

Sistemas de rendimiento del conductor pueden supervisar el rendimiento de un conductor o vehículo a través de la información registrada, como el tiempo en la carretera, la velocidad del vehículo, y el tiempo entre las pausas de viaje.

Los sistemas de pesaje en movimiento (WIM) o dinámicos miden el peso del vehículo que viaja sobre el sistema, esto permite que oficiales identifiquen eficientemente los vehículos que operan con exceso de peso en la carretera.

Algunas de las tecnologías mencionadas ya se emplean en México. Actualmente se está trabajando en la implementación del sistema de pesaje dinámico; este sistema permitiría incrementar los índices de seguridad vial y favorecería el cuidado de la infraestructura.

8. CONCLUSIONES

Para el 2014 se registró que el 11.48% del parque vehicular del autotransporte de carga, corresponde a autotransporte de carga especializada de materiales peligrosos, porcentaje nada despreciable.

En función de los datos de la carga, los vehículos doble articulados involucrados en accidentes muestran porcentajes superiores que cuando transportan carga en general (esto es un 23.9 % en comparación con un 14.4%), lo cual conlleva entre otras cosas, a que en caso de siniestros al verse involucrado un vehículo doblemente articulado, se tendrán accidentes más severos. Con estos resultados sería interesante considerar mejoras en las normativas o inclusive ser más estrictos para su cumplimiento de manera que se logre reducir la frecuencia y severidad de los accidentes.

Los transportistas deben respetar las rutas indicadas dentro del proceso logístico, ya que una selección de ruta tiene un proceso muy importante detrás, cuyo resultado final ofrece casi siempre una ruta con un riesgo mínimo (en función de la exposición de la población) y un costo optimizado (en función de la distancia del recorrido). Si se produce un accidente en una ruta distinta a la indicada, en la que, por ejemplo, la exposición al riesgo de la población sea más alta, las consecuencias serían catastróficas.

Cuando son necesarios varios envíos, una sola población o región puede estar en mayor riesgo si todos los envíos son transportados por la misma ruta, por lo que se puede considerar propagar el riesgo a través de múltiples caminos. Sin embargo, se debe tener cuidado, ya que el conjunto de caminos que distribuye más equitativamente el riesgo puede resultar ser más peligroso en general que una única ruta con varios envíos.

Actualmente, existen diversos ITS que, aunque no se utilizan específicamente para evaluar los riesgos o determinar rutas, proporcionan información para aumentar la seguridad del transporte de materiales peligrosos.

RECONOCIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con fondos de la Red Temática de Investigación: Accidentes Viales (Número 253411), como parte del programa de Redes Temáticas de Investigación 2015 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

REFERENCIAS

- ASOCIACIÓN NACIONAL DE LA INDUSTRIA QUÍMICA A.C., ANIQ. (2014). *Anuario Estadístico de la Industria Química Mexicana*. México, DF.
- CLOUTIER, M. Y CUSHMAC, G. (2012). *Guía de Respuesta de Emergencia (GRE2012)*.

México, DF.

HANCOCK, K. L. (2001). *Handbook of logistics and supply-chain management-Hazardous goods*. London, United Kingdom.

MENDOZA, A Y RODRÍGUEZ, J. (2005) *Manejo y Seguridad en el Transporte de Productos Peligrosos en México*. Querétaro.

MENDOZA, F., ROMERO, L. Y CUEVAS, A. (2012). *Vulnerabilidad de las carreteras por el transporte de materiales y residuos peligrosos*. Publicación Técnica No. 364. IMT. Sanfandila, Qro.

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (2012a). *Reglamento para el Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos*. México, DF.

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (2012b). *NORMA Oficial Mexicana NOM-002-SCT/2011, Listado de las sustancias y materiales peligrosos más usualmente transportados*. México, DF.

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (2014). *Estadística Básica del Autotransporte Federal*. México, DF.

31 Modelo de impacto socioeconómico para la construcción de un corredor ferroviario de mercancías en Extremadura (España)

Juan Francisco Coloma Miró

Marta García García

Universidad de Extremadura, España

RESUMEN

El análisis del impacto de la construcción y puesta en servicio de una infraestructura ferroviaria de mercancías debe contemplar el sistema económico regional en su integridad, ya que dicho impacto se extiende más allá de la contribución directa al incremento de la producción y la consiguiente generación de rentas de capital, con la remuneración del trabajo incorporado en dicha actividad. Es necesario, por tanto, cuantificar los efectos indirectos que se generan con las compras de bienes y servicios, así como de las rentas generadas tanto de los proveedores directos como indirectos.

La presente investigación tiene como objetivo el cálculo del impacto total producido por un corredor ferroviario de mercancías sobre la economía regional de Extremadura (España), que se corresponderá con la suma de los impactos directos, indirectos e inducidos. Para su determinación se crea una herramienta de simulación a partir de unas tablas “Input-Output” que permiten comparar diferentes niveles de impacto en función de la intensidad de las inversiones realizadas o de la actividad desarrollada, tras la puesta en marcha del nuevo corredor ferroviario. La investigación concluye con la rentabilidad de la actuación: la inversión prevista es de 161 M€ durante 3 años en el corredor ferroviario de mercancías extremeño, cada euro invertido retorna en más de 2 euros al sistema productivo extremeño y genera 4 100 puestos de empleo.

Palabras clave: Impacto socioeconómico, transporte de mercancías, ferrocarril.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La Red Transeuropea de Transporte (RTE-T) está compuesta por un conjunto de redes prioritarias de transporte que facilitan la comunicación de personas y mercancías a lo largo de toda la Unión Europea. El eje 16 era un corredor ferroviario de mercancías de gran capacidad y altas prestaciones, que fue incluido desde 2003 en esta red. Partía de los puertos de Sines y Algeciras, atravesaba la península ibérica y cruzaba el centro de los Pirineos por medio de un túnel de baja cota, para llegar a París. En diciembre de 2013, el Parlamento Europeo (UE, 2013) estableció un vuelco radical a los ejes prioritarios de la RTE-T, a través de la reducción de los 30 ejes iniciales, a 9 para el período 2014-2020. Una parte del eje 16,

en concreto el corredor ferroviario de mercancías manchego-extremeño (Cofemanex) desapareció como eje de la Red Básica y pasó a pertenecer a la Red Global, de ejecución no prevista hasta 2050. Cofemanex forma parte de la línea de ferrocarril Madrid - Ciudad Real-Badajoz, tiene una longitud de 304 km y discurre de forma transversal (de este a oeste) por las comunidades de Castilla la Mancha (91 km) y Extremadura (213 km). Cofemanex se inicia en Puertollano (Castilla la Mancha) y finaliza en Badajoz (Extremadura) en la frontera con Portugal (Figura 1).

La cercana inauguración de las obras de ampliación del Canal de Panamá va a aumentar previsiblemente, el tráfico de grandes buques mercantes que provienen de los principales puertos asiáticos, con lo que los puertos de Sines y Algeciras que sirven de entrada-salida a la península ibérica, ganarán mucho volumen de mercancías. Para poder garantizar el correcto traslado de los productos que parten del puerto de Sines hacia Europa será necesario que Extremadura posea una infraestructura ferroviaria de mercancías que permita la circulación de ferrocarriles de altas prestaciones. Coloma (2015a) justificó la necesidad de invertir 161 M€ para la puesta en servicio del Cofemanex y otros 80 M€ adicionales durante sus 5 primeros años de explotación para dotar al corredor de altas prestaciones.

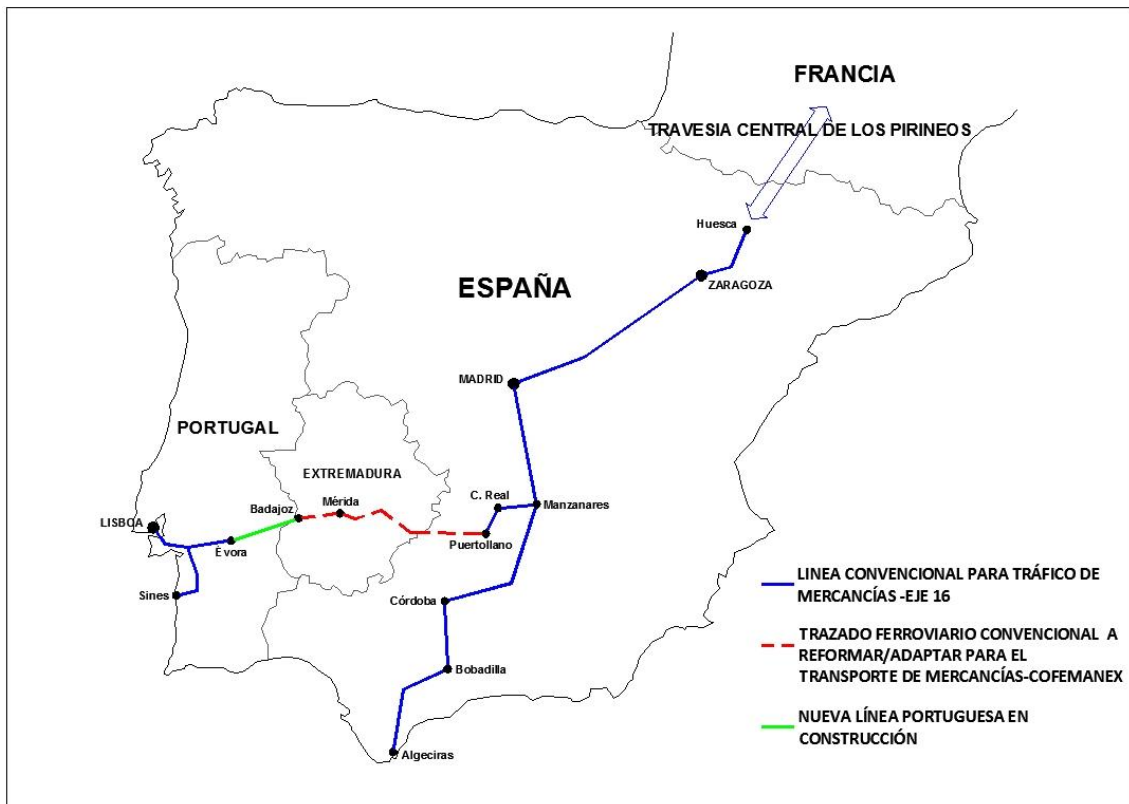


Figura 1. Ámbito geográfico del Corredor Ferroviario de Mercancías Manchego-Extremeño (Cofemanex)

La investigación persigue en primer lugar, evaluar la contribución de la infraestructura del corredor ferroviario de mercancías de altas prestaciones en su fase de construcción, a la producción y empleo regionales y posteriormente, los efectos que podría inducir la entrada en funcionamiento de esta nueva infraestructura sobre la productividad y el empleo de la comunidad extremeña.

2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN

El análisis “input-output” ha supuesto una valiosa herramienta para el estudio de los sistemas productivos ya que considera que los efectos de la demanda sobre el sistema productivo no se agotan en su simple satisfacción directa, sino que se difunden y multiplican a través del entramado de interrelaciones intermedias dominantes en el tejido económico. Estos análisis requieren de la creación de una tabla “Input-Output” simétrica (TIO) que sea capaz de plasmar el conjunto del sistema económico sobre el cual se medirán las interrelaciones y principales variables, dentro de las cuentas de producción y explotación de una economía determinada.

Esta tabla o matriz simula todas las relaciones intersectoriales de una economía dada, lo que permite establecer sobre ella un modelo de naturaleza “Input-Output” general de demanda, que cuantifica los impactos en los vectores de producción, valor agregado y empleo, asociados a un determinado volumen de inversión/facturación en un periodo temporal de referencia. Se trata por tanto, del método idóneo para cuantificar los efectos socioeconómicos de las inversiones requeridas para la adecuación del Cofemanex y su posterior explotación como corredor de altas prestaciones, sobre el conjunto del sistema económico de Extremadura.

2.1 Descripción básica del modelo “Input-Output”

Dado que no existe una tabla reciente “Input-Output” regional (TIO-R) para Extremadura (la última disponible es de 1990), de entre las doce comunidades autónomas españolas que sí disponen de TIO se seleccionó la de 2008 de la comunidad autónoma de Castilla-La Mancha (IES, 2009), que es la última actualizada y cuenta con la estructura del Valor Agregado Bruto (VAB) más próxima a la de Extremadura. El modelo de impacto derivado de las tablas TIO-R opera sobre una base de coeficientes técnicos de producción, VAB y empleo; es decir, lo hace en términos relativos, de ahí que se pueda trasladar el uso de estos ratios al caso extremeño. Por su parte, los valores absolutos del modelo se obtuvieron de información estadística actualizada de Extremadura.

El planteamiento parte de la cuantificación de los indicadores de desempeño sobre los que se construyen los vectores de impacto I_t^e , para cada una de las etapas consideradas “e” (construcción y explotación), y cada uno de los años contemplados en el horizonte temporal del análisis “t”. Siendo A la matriz inversa de la matriz insumo-producto, el cálculo de la producción total necesaria para abastecer esta demanda inicial P_t^e se realiza a través de la

Ecuación 1 (Leontief, 1986)

$$P_r^e = [I - A]^{-1} * I_r^e \quad (1)$$

Tarancón (2003) describe la forma de obtener la renta total generada (VAB^e_t), el empleo necesario para realizar esta producción y los retornos fiscales a partir de la producción calculada y los coeficientes de valor agregado y de empleo de las tablas TIO-R.

Los indicadores de impacto socioeconómico finalmente generados son:

- Valor total de la producción regional, renta total (valor agregado) y recaudación fiscal generada por las principales figuras impositivas, tanto de forma directa, como indirecta e inducida, con diferenciación de las etapas de construcción y de explotación.
- Empleo total generado, tanto de forma directa, como indirecta e inducida, con diferenciación de las etapas de construcción y de explotación.

La Figura 2 sintetiza el proceso metodológico a seguir para la cuantificación de los efectos asociados a la construcción (puesta en servicio) y explotación del Cofemanex.

Para llevar a cabo esta metodología fue necesario:

- Identificar los flujos de adquisición de bienes y servicios durante las etapas de construcción y explotación de la red ferroviaria de altas prestaciones.
- Calcular los correspondientes efectos macroeconómicos, tanto directos como indirectos e inducidos, en términos de producción, valor agregado y empleo.



Figura 2. Metodología de Evaluación de Impacto Socioeconómico

Los flujos a considerar en la etapa de construcción y puesta en servicio, constituirán el efecto directo y estarán formados por todas aquellas inversiones que se realicen para la adecuación del corredor logístico ferroviario. Para la etapa de explotación, será necesario identificar los montos totales de facturación que generarán los diferentes agentes vinculados con el corredor logístico ferroviario y que deberían incluir, no sólo las actividades estrictas de transporte de mercancías, sino todos aquellos servicios generados alrededor de la infraestructura de referencia (mantenimiento de la infraestructura, actividades de hostelería, formación, etc.). Adicionalmente, se incluyen otra serie de inversiones que coadyuvan a la dinamización de la actividad de transporte en el corredor logístico (electrificación, actuaciones en plataformas logísticas, ejecución de accesos a nodos logísticos, etc.).

El cálculo del efecto directo vendrá determinado por el valor agregado y el empleo utilizado en cada una de estas actividades, mientras que el efecto indirecto se calculará a partir de las compras de bienes y servicios que realicen a otros proveedores. Además del cálculo de los efectos directos e indirectos generados como consecuencia de las transacciones económicas originadas, se incluyen también los denominados efectos inducidos, que serán aquellos efectos provocados por las rentas generadas a partir de los anteriores.

2.1.1 Fase de construcción y puesta en servicio: inversiones y supuestos a considerar

Coloma (2015a) establece en la Tabla 1 un programa de inversiones para la adecuación competitiva del sistema logístico de Extremadura, que comprendería no sólo los trabajos de mejora en el corredor ferroviario entre Puertollano y Badajoz sino también las actuaciones asociadas al desarrollo de los nodos logísticos regionales.

La distribución de dicha inversión en el tiempo se justifica de la siguiente forma:

- 2014: Renovación de vía de Aljucén-Mérida (1.58 M€) y primera anualidad de la Plataforma Logística del Suroeste Europeo (0,75 M€). Esto hace un total de 2.33 M€ (1.45% de la inversión prevista en la fase de construcción).
- 2015: 45 % del total de la inversión prevista, incluye la segunda anualidad de la Plataforma Logística y todas las conexiones ferroviarias. Se prevé un total de 72 537 100 € de inversión.
- 2016: 53.55% del total de la inversión, incluye la tercera anualidad de la Plataforma Logística. Se prevé invertir los 86.326.454,01 € restantes.

Las características y potencialidades productivas de la economía extremeña hacen pensar que el balasto se pueda obtener en Extremadura, mientras que las traviesas y los carriles se comprarían en otras regiones españolas. Con esta hipótesis el 35% de la inversión correspondiente a manufacturas se producen en Extremadura y el 65% restante se importa de otras regiones. De conformidad con la información y los supuestos considerados, las Tablas 2 y 3 presentan respectivamente, la asignación sectorial de la inversión y la distribución anual de la inversión, desagregada a su vez, por sectores de impacto en la economía regional. Los costes relativos al transporte de bienes de importación han sido

computados en la tabla de inversiones, en su sector correspondiente, y distribuidos proporcionalmente, según anualidades durante el periodo temporal de referencia (2014-2016).

2.1.2. Fase de explotación: facturación, inversiones y supuestos a considerar

Se trabaja sobre un horizonte temporal de cinco años, desde la puesta en servicio de la red de altas prestaciones para mercancías en Extremadura, que en este caso es el periodo 2017-2021.

Se considera que la explotación óptima de la infraestructura ferroviaria generará retornos/impactos en los siguientes productos/componentes de actividad:

- A) Mantenimiento de la infraestructura en el tramo de referencia Badajoz-Puertollano. El administrador de infraestructuras ferroviarias (ADIF, 2015) valora en 33 000 €/Km-año el coste medio de mantenimiento de un kilómetro de red convencional (vía simple y ancho ibérico) al año en España. El coste total de mantenimiento se distribuye entre los sectores productivos de construcción y manufacturas, a razón de una proporción de 60 (mantenimiento de la vía)/ 40 (mantenimiento de la infraestructura e instalaciones).
- B) Transporte ferroviario de mercancías y acarreos de la carga a/desde las terminales intermodales (aumento de la demanda). En la Tabla 4 se presenta la demanda potencial captable por el ferrocarril descrita por Coloma (2015b), bajo las siguientes premisas:
- Tramo ferroviario Badajoz-Puertollano dedicado al transporte de mercancías.
 - Puerto de Sines cumple con sus previsiones de tráfico de 1.7 millones de contenedores en el año 2016.
 - Mejora de la red ferroviaria Portuguesa en el tramo Sines-Badajoz, prevista en 2019.

A partir de esta demanda potencial se convierten a moneda las expectativas de incremento de los tráficos ferroviarios de mercancías en el corredor logístico de referencia, considerando sólo los impactos vinculados con los tráficos ferroviarios “import/export” con origen/destino en Extremadura. Se entiende que dichos impactos tendrán reflejo en tres niveles: transporte por carretera a/desde las terminales intermodales de la región (único nivel contemplado en el modelo), reducción de las externalidades del transporte y ganancias de competitividad para las empresas productoras de la región por la reducción de sus costes logísticos. Las distancias de acarreo ida y vuelta de mercancías por carretera dentro de Extremadura se estiman de 120 Km. El coste de una tonelada de mercancía transportada por carretera en un camión articulado de 25 t de carga útil es de 1.23 €/Km (Ministerio de Fomento, 2015). En la Tabla 5 se muestra el valor monetario de la demanda de transporte de mercancías en el corredor logístico de altas prestaciones en Extremadura para el horizonte temporal de referencia (2017-2021).

C) Actividades conexas o auxiliares de las anteriores, como formación, asesoría, hostelería, etc. Se realiza una estimación sobre el monto de facturación vinculado a la explotación del 2.0% del total invertido. La asignación sectorial de estas actividades conexas al transporte

corresponde al epígrafe de “Comercio; reparación de vehículos; transporte y almacenamiento; hostelería”.

D) Otras inversiones complementarias al desarrollo del corredor ferroviario de altas prestaciones y del sistema logístico regional. Se computan dentro de este capítulo las inversiones destinadas a la potenciación de la logística y al tráfico ferroviario de mercancías, como las actuaciones vinculadas a la electrificación de la línea de referencia y a las conexiones ferroviarias (accesos) de los nodos logísticos del territorio. La asignación sectorial de esa inversión corresponderá íntegramente al sector de la construcción. Para el periodo 2019-2021, Coloma (2015a) justifica una inversión complementaria de 79,538 M€, desglosado en 69,528 M€ para la electrificación de la línea y 10,01 M€ para la ejecución de los accesos ferroviarios. El monto global de las inversiones previstas durante la explotación del Cofemanex se desglosa en la Tabla 6.

Tabla 1. Inversiones en la fase de construcción y puesta en servicio. Periodo 2014-2016

| | Actividad | Monto |
|---|---|-------------------------|
| 1 | Renovación de vía | 83 216 412.89 € |
| 2 | Señalización, instalaciones de seguridad y bloqueos de vía | 18 200 000.00 € |
| 3 | Electrificación de la vía | 20 372 330.60 € |
| 4 | Instalaciones logísticas. Plataforma Logística del Suroeste Europeo | 24 950 000.00 € |
| 5 | Instalaciones logísticas. Conexiones ferroviarias Plataforma Logística Suroeste Europeo y Expaciomérida | 14 454 810.52 € |
| | Total inversión | 161 193 554.01 € |

Tabla 2. Fase de construcción y puesta en servicio. Asignación sectorial de la demanda

| Asignación sectorial de la demanda | | Distribución actividad manufacturera | |
|---|-----|---|-----|
| Manufacturas | 25% | Producción interna | 35% |
| | | Importación | 65% |
| Construcción | 65% | | |
| Estudios /Asistencias | 8% | | |
| Otros (inmobiliarias, seguros...) | 2% | Transporte (por importación) (*) | 8% |

(*) La importación de productos generará retornos en la actividad del transporte por carretera, que se cifran en un 8% de los costes de importación

Fuente: Ministerio de Fomento, 2005

Tabla 3. Fase de construcción y puesta en servicio. Distribución anual de la inversión por sectores de actividad

| Sectores de actividad | Inversión (miles de euros) | | | |
|--|----------------------------|--------------|---------------|---------------|
| | Total | 2014 | 2015 | 2016 |
| | | 1.45% | 45% | 53.55% |
| Industrias extractivas; industria manufacturera; suministro de energía eléctrica... | 40 299 | 205 | 6 347 | 7 553 |
| Construcción | 104 776 | 1 519 | 47 149 | 56 108 |
| Comercio; reparación de vehículos; transporte y almacenamiento; hostelería | 2 096 | 30 | 943 | 1 122 |
| Actividades inmobiliarias | 1 612 | 23 | 725 | 863 |
| Act. profesionales, científicas y técnicas; actividades administrativas y auxiliares | 12 896 | 187 | 5 803 | 6 906 |
| Admón. pública; seguridad social; educación; act. sanitarias, servicios sociales | 1 612 | 23 | 725 | 863 |
| Actividades artísticas, recreativas y entretenimiento | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total producción regional | 137 095 | 1 988 | 61 693 | 73 415 |
| Total importación | 26 194 | 380 | 11 787 | 14 027 |
| Transporte vinculado a la importación | 2 096 | 30 | 943 | 1 122 |
| Total sin transporte | 161 194 | | | |
| Total con transporte | 163 290 | | | |

Tabla 4. Demanda potencial (peso) de mercancías del Cofemanex. Periodo 2017-2021

| | Toneladas transportadas | | | | |
|----------------------------------|-------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
| Origen-Destino tramo Extremadura | 1 163 940 | 1 190 711 | 1 220 478 | 1 263 195 | 1 326 355 |
| Tránsito | 1 225 588 | 1 253 776 | 1 931 745 | 1 999 356 | 2 099 324 |
| Total | 2 389 528 | 2 444 487 | 3 152 223 | 3 262 551 | 3 425 679 |

Tabla 5. Demanda del transporte de mercancías en Extremadura. Periodo 2017-2021

| Unidades | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|----------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Miles tkm | 139 673 | 142 885 | 146 457 | 151 583 | 159 163 |
| Miles € | 6 872 | 7 030 | 7 206 | 7 458 | 7 831 |

Tabla 6. Fase de explotación. Inversiones anuales previstas

| Coste de Mantenimiento | | |
|-------------------------------|--------------|----------------|
| Coste red convencional | 33 000 | €/km-año |
| Longitud del tramo | 299 | km |
| Coste anual trazado | 9 867 | miles € |

| | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|---|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Mantenimiento del tramo (miles de €) | 9 867 | 9 867 | 9 867 | 9 867 | 9 867 |
| Construcción (vía) 60% | 5 920 | 5 920 | 5 920 | 5 920 | 5 920 |
| Manufacturas (instalaciones): 40% | 3 947 | 3 947 | 3 947 | 3 947 | 3 947 |
| Actuaciones complementarias 79 538 miles de € | 0 | 0 | 26 513 | 26 513 | 26 513 |
| Electrificación de la línea: 69 528 miles de € | | | 23 176 | 23 176 | 23 176 |
| Accesos ferroviarios: 10 011 miles de € | | | 3 337 | 3 337 | 3 337 |
| Demanda (miles €) | 6 872 | 7 030 | 7 206 | 7 458 | 7 831 |
| Actividades conexas (miles de €) | 335 | 338 | 872 | 877 | 884 |

Tabla 7. Fase de explotación. Distribución de la inversión por sectores de actividad

| Sectores de actividad | Total | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--|------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | (miles de euros) | | | | | |
| Industrias extractivas; manufacturera; suministro de energía eléctrica | 19 734 | 3 947 | 3 947 | 3 947 | 3 947 | 3 947 |
| Construcción | 109 139 | 5 920 | 5 920 | 32 433 | 32 433 | 32 433 |
| Comercio; reparación de vehículos; transporte y almacenamiento; hostelería | 39 702 | 7 207 | 7 368 | 8 078 | 8 335 | 8 715 |
| Totales | 168 575 | 17 074 | 17 235 | 44 457 | 44 714 | 45 095 |

La Tabla 7 incluye la distribución anual de la facturación en la etapa de explotación, desagregada, a su vez, según los sectores de actividad y componentes de impacto en la economía regional.

2.2 Diseño del escenario macroeconómico de referencia

Con el fin de contextualizar adecuadamente los resultados del análisis de impacto se procede a la construcción de un escenario macroeconómico de referencia que se extienda a lo largo del horizonte temporal considerado para el análisis, y que contemple los principales indicadores de impacto seleccionados: Producción, VAB, Empleo y Retorno Fiscal.

2.2.1 Proyección de variables en Extremadura: claves y supuestos

Las variables fundamentales a proyectar en el horizonte temporal de referencia son:

A) Población residente. El Instituto de Estadística de Extremadura (IEEX, 2013) aporta la serie proyectada de población residente en la región.

B) Producto Interior Bruto (PIB) Nominal. El Instituto Nacional de Estadística (INE, 2014a) aporta la serie histórica de la Contabilidad Regional de España y detalla la evolución del PIB en Extremadura a precios corrientes (PIB Nominal) para el periodo 2008-2013. Para la proyección del 2014 y sucesivos se siguen los siguientes criterios:

- Crecimiento económico débil o parón de actividad en la zona euro.
- Nivel de endeudamiento de la Comunidad Autónoma que limita la capacidad para dinamizar actuaciones.
- Baja diversificación de la actividad productiva, falta de dinamismo competitivo y de capital humano.

En este contexto, para los cálculos del modelo se considera un crecimiento débil (0-1% interanual) para el periodo 2014-2016, y algo más intenso (1-2% interanual) para el periodo 2017-2021.

C) Deflactor del PIB. Se toma como base el ciclo de la serie histórica española desde 2008. Para la proyección de los ejercicios siguientes se toma como fuente de referencia el boletín económico del Banco de España (BE, 2015), que apunta a una inflación débil y sostenida en el tiempo. A efectos prácticos, se considera una inflación constante del 0.4% interanual para todo el horizonte temporal, sobre la que se determina el PIB Real (a precios constantes) para el horizonte temporal de referencia.

D) Productividad por ocupado. La productividad aparente se expresa como el cociente entre el PIB Real y el número de ocupados. Por tanto, de BE (2015) e INE (2014a), se puede calcular la productividad aparente de Extremadura en la serie histórica 2008-2013. En este sentido, se puede comprobar como el comportamiento de la productividad por ocupado sufre aumentos en los años de crisis, debido a que el ajuste de las empresas a los cambios en la situación del conjunto de la economía se realiza principalmente vía el empleo. Eso explicaría el crecimiento de la productividad por ocupado, en torno al 1.4% de promedio interanual desde el 2009. Para los cálculos del modelo económico, se considera un incremento interanual de la productividad aparente más débil que el consignado en la serie histórica, del

0.5% para el periodo 2014-2016, y del 0.75-1.00% para el periodo 2017-2021.

E) Salario medio. INE (2014b) aporta la serie 2008-2013 de costos laborales. Para la proyección del salario medio en el horizonte temporal de referencia, se tiene en cuenta la tendencia de la serie histórica junto con el contexto macroeconómico, estimando un crecimiento interanual del salario medio del 1% para el periodo 2014-2016 y del 1.5% para el resto de ejercicios. La Tabla 8 refleja el escenario macroeconómico de referencia del modelo de impacto socioeconómico.

Tabla 8. Escenario básico macroeconómico

| | 2008 | 2009 | 2010 |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Población residente | | | |
| Variación interanual pob. residente | | | |
| Población de 16 años y más | | | |
| Proporción de Activos (INE, 2014c) | | | |
| | | | |
| PIB Nominal precios corrientes (miles €) | 17 628 677 | 17 144 187 | 17 176 789 |
| Variación interanual PIB Nominal | 0.00% | -2.75% | 0.19% |
| Renta per cápita: PIB Nominal/Población total (€/persona) | | | |
| Deflactor PIB (base 2008 = 100) | 100 | 100.1 | 100.2 |
| Variación interanual PIB Real: Variación PIB Nominal-Deflactor | 0.00% | -2.85% | 0.09% |
| PIB Real precios constantes (base 2008) miles de euros | 17 628 677 | 17 127 060 | 17 142 504 |
| | | | |
| Total de ocupados (miles de personas) | 396.9 | 374.6 | 370.4 |
| Productividad aparente: PIB Real/Ocupados | 44 416 | 45 721 | 46 281 |
| Variación interanual Productividad | 0.00% | 2.94% | 1.23% |
| | | | |
| Salario medio (euros) | 17 983 | 18 820 | 19 198 |
| Variación interanual Salario medio | 0.00% | 4.65% | 2.01% |

Tabla 8 continuación. Escenario básico macroeconómico

| | 2011 | 2012 | 2013 |
|---|-------------|-------------|-------------|
| Población residente | | | 1 101 309 |
| Variación interanual pob. residente | | | |
| Población de 16 años y más | | | 931 767 |
| Proporción de Activos (INE, 2014c) | | | 57% |
| | | | |
| PIB Nominal precios corrientes (miles €) | 16 954 368 | 16 371 570 | 16 199 826 |
| Variación interanual PIB Nominal | -1.29% | -3.44% | -1.05% |
| Renta per cápita: PIB Nominal/Población total (€/persona) | | | 14 710 |
| Deflactor PIB (base 2008 = 100) | 100.2 | 100.2 | 100.8 |
| Variación interanual PIB Real: Variación PIB Nominal-Deflactor | -1.29% | -3.44% | -1.65% |
| PIB Real precios constantes (base 2008) miles de euros | 16 920 527 | 16 338 892 | 16 071 256 |
| | | | |
| Total de ocupados (miles de personas) | 361.2 | 343.4 | 332.4 |
| Productividad aparente: PIB Real/Ocupados | 46 845 | 47 580 | 48 349 |
| Variación interanual Productividad | 1.22% | 1.57% | 1.62% |
| | | | |
| Salario medio (euros) | 19 473 | 19 084 | 18 419 |
| Variación interanual Salario medio | 1.43% | -2.00% | -3.48% |

Tabla 8 continuación. Escenario básico macroeconómico

| | 2014 | 2015 | 2016 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Población residente | 1 098 909 | 1 096 327 | 1 093 573 |
| Variación interanual pob. residente | -0.22% | -0.23% | -0.25% |
| Población de 16 años y más | 930 171 | 928 466 | 926 872 |
| Proporción de Activos (INE, 2014c) | | | |

| | | | |
|---|------------|------------|------------|
| PIB Nominal precios corrientes (miles €) | 16 280 825 | 16 411 072 | 16 575 182 |
| Variación interanual PIB Nominal | 0.50% | 0.80% | 1.00% |
| Renta per cápita: PIB Nom./ Población total (€/persona) | 14 815 | 14 969 | 15 157 |
| Deflactor PIB (base 2008 = 100) | 101.20 | 101.60 | 102.00 |
| Variación interanual PIB Real: Variación PIB Nominal-Deflactor | 0.10% | 0.40% | 0.60% |
| PIB Real precios constantes (base 2008) (miles €) | 16 087 772 | 16 152 630 | 16 250 179 |

| | | | |
|--|--------|--------|--------|
| Total de Ocupados (miles de personas) | 331.09 | 330.77 | 331.11 |
| Productividad aparente: PIB Real/Ocupados | 48 591 | 48 834 | 49 078 |
| Variación interanual Productividad | 0.50% | 0.50% | 0.50% |

| | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| Salario medio (euros) | 18 603 | 18 789 | 18 977 |
| Variación interanual Salario medio | 1.00% | 1.00% | 1.00% |

Tabla 8 continuación. Escenario básico macroeconómico

| | 2017 | 2018 | 2019 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|-------------|
| Población residente | 1 090 675 | 1 087 597 | 1 084 382 |
| Variación interanual pob. residente | -0.27% | -0.28% | -0.30% |
| Población de 16 años y más | 925 315 | 923 607 | 921 818 |
| Proporción de Activos (INE, 2014c) | | | |

| | | | |
|---|------------|------------|------------|
| PIB Nominal precios corrientes (miles €) | 16 782 372 | 17 034 108 | 17.289.619 |
| Variación interanual PIB Nominal | 1,25% | 150% | 1.50% |
| Renta per cápita: PIB Nom./ Población total (€/persona) | 15 387 | 15 662 | 15 944 |
| Deflactor PIB (base 2008 = 100) | 102.40 | 102.80 | 103.20 |
| Variación interanual PIB Real: Variación PIB Nominal-Deflactor | 0.85% | 1.10% | 1.10% |
| PIB Real precios constantes (base 2008) (miles €) | 16 389 035 | 16 570 144 | 16 753 507 |

| | | | |
|--|--------|--------|--------|
| Total de Ocupados (miles de personas) | 331.45 | 332.62 | 332.97 |
| Productividad aparente: PIB Real/Ocupados | 49 446 | 49 817 | 50 315 |
| Variación interanual Productividad | 0.75% | 0.75% | 1.00% |

| | | | |
|------------------------------------|--------|--------|--------|
| Salario medio (euros) | 19 262 | 19 551 | 19 844 |
| Variación interanual Salario medio | 1.50% | 1.50% | 1.50% |

Tabla 8 continuación. Escenario básico macroeconómico

| | 2020 | 2021 |
|-------------------------------------|-------------|-------------|
| Población residente | 1 081 040 | 1 077 600 |
| Variación interanual pob. residente | -0.31% | -0.32% |
| Población de 16 años y más | 920 194 | 918 528 |
| Proporción de Activos (INE, 2014c) | | |

| | | |
|---|------------|------------|
| PIB Nominal precios corrientes (miles €) | 17.592.188 | 17.944.032 |
| Variación interanual PIB Nominal | 1.75% | 2.00% |
| Renta per cápita: PIB Nom./ Población total (€/persona) | 16 273 | 16 652 |
| Deflactor PIB (base 2008 = 100) | 103.60 | 104.00 |
| Variación interanual PIB Real: Variación PIB Nominal-Deflactor | 1.35% | 1.60% |
| PIB Real precios constantes (base 2008) (miles €) | 16 980 876 | 17 253 876 |

| | | |
|--|--------|--------|
| Total de Ocupados (miles de personas) | 334.15 | 336.16 |
| Productividad aparente: PIB Real/Ocupados | 50 818 | 51 326 |
| Variación interanual Productividad | 1.00% | 1.00% |

| | | |
|------------------------------------|--------|--------|
| Salario medio (euros) | 20 142 | 20 444 |
| Variación interanual Salario medio | 1.50% | 1.50% |

3. RESULTADOS

3.1 Herramienta de simulación

El modelo diseñado se implementa en una herramienta de simulación que permite comparar diferentes niveles de impacto en función de la intensidad de las inversiones realizadas o de la actividad desarrollada tras la puesta en marcha del nuevo corredor logístico ferroviario. A efectos de facilitar la transferencia del modelo desarrollado y su posterior utilización se ha optado por desarrollar dicha herramienta en un entorno estandarizado de fácil comprensión por parte de los usuarios finales como es la hoja de cálculo de Microsoft EXCEL.

Las Tablas 9 y 10 cuantifican el impacto económico total y desagregado, tanto en términos absolutos como relativos, de las inversiones de adecuación de la línea ferroviaria y de articulación del sistema logístico regional, así como del funcionamiento del corredor logístico de altas prestaciones (intensidad de uso de la infraestructura ferroviaria y servicios

auxiliares) en Extremadura.

3.2 Efectos sobre la producción

El impacto económico total de la inversión realizada en la construcción y puesta en servicio del corredor ferroviario de altas prestaciones en Extremadura, así como en el desarrollo del sistema logístico regional, supera los 341 millones de euros en el periodo 2014-2016, lo que equivale a un retorno en la dinámica productiva regional de 2.12 euros por cada euro de inversión. El desembolso de las inversiones previstas provocará un efecto de arrastre (indirecto más inducido) en la economía regional, por incremento de la actividad del sistema productivo y por el efecto del incremento de las rentas dedicadas al consumo, de más de 205 millones de euros en el periodo 2014-2016, lo que representa un efecto multiplicador de 1.49. Esto significa que por cada euro de demanda directa en el sistema productivo regional se genera un efecto de arrastre de 1.49 euros en la economía del territorio. El impacto de las inversiones en la producción se representa en la Figura 3.

Por anualidades, cabe destacar fundamentalmente el ejercicio 2016, donde los efectos totales sobre la producción llegan a representar el 1.10% del PIB regional proyectado para ese año. En conjunto, el impacto total de este “shock” de demanda en el periodo 2014-2016 equivale al 2.07% del PIB nominal de Extremadura en 2013 (INE, 2014a).

Durante la fase de explotación, las actuaciones complementarias en el sistema logístico regional mediatizan los resultados, aunque cabe destacar los efectos asociados al incremento de la demanda de transporte. La contribución de los efectos inducidos, es decir, la demanda de bienes y servicios del consumo que realizan todos los trabajadores cuyos ingresos dependen, directa o indirectamente, de los efectos anteriores (directos más indirectos), equivale al 20.64% del impacto total en la Producción en el horizonte temporal de referencia.

En la Figura 3, se puede comprobar la intensidad del efecto derivado de los flujos de inversión en el sistema productivo regional, antes del 2017 y del 2019 en adelante.

3.3 Efectos sobre el VAB (renta generada)

El agregado de inversiones para el periodo 2014-2016 representa el 1.22 % del VAB autonómico de 2013 (INE, 2014a), con la construcción, la industria y los servicios como actividades motoras principales. Con respecto al PIB regional estimado, el VAB generado en el horizonte temporal de referencia representa hasta un 0.6% del PIB de Extremadura en el ejercicio 2016. La Figura 4 muestra el impacto de las inversiones sobre el VAB.

Tabla 9. Impacto en términos absolutos de las inversiones (2014-2021)

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|--------------|----------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| Total | 4 952 | 153 725 | 182 971 | 40 431 | 40 815 | 111 957 | 112.546 | 113 407 |
| Directos | 1 988 | 61 693 | 73 415 | 17 276 | 17 439 | 44 980 | 45 238 | 45 621 |
| Indirectos | 1 956 | 60 710 | 72 245 | 14 492 | 14 593 | 43 843 | 44 004 | 44 243 |
| Inducidos | 1 008 | 31 322 | 37 312 | 8 663 | 8 784 | 23 134 | 23 304 | 23 543 |

Efectos en términos de VAB (Renta generada) Miles de €

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| Total | 2 613 | 81 124 | 96 562 | 22 554 | 22 791 | 59 055 | 59.418 | 59 949 |
| Directos | 943 | 29 279 | 34 842 | 9 058 | 9 159 | 21 161 | 21 322 | 21 561 |
| Indirectos | 1 044 | 32 414 | 38 573 | 8 122 | 8 183 | 23 542 | 23 639 | 23 783 |
| Inducidos | 625 | 19 431 | 23 147 | 5 374 | 5 449 | 14 352 | 14 457 | 14 605 |

Efectos en términos de Empleo (necesidades unitarias) N° Empleos

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|-------------|--------------|--------------|-------------|-------------|--------------|--------------|--------------|
| Total | 61 | 1 874 | 2 210 | 518 | 518 | 1 315 | 1 305 | 1 300 |
| Directos | 24 | 738 | 870 | 229 | 230 | 526 | 524 | 524 |
| Indirectos | 23 | 703 | 829 | 171 | 170 | 483 | 478 | 474 |
| Inducidos | 14 | 433 | 511 | 117 | 118 | 305 | 303 | 302 |

Efectos fiscales Miles de €

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|-----------------------|-------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| Total | 588 | 18.238 | 21.704 | 5.078 | 5.126 | 13.220 | 13.297 | 13.410 |
| Imp. Renta Familiar | 156 | 4.858 | 5.787 | 1.344 | 1.362 | 3.588 | 3.614 | 3.651 |
| Imp. Renta Empresas | 165 | 5.129 | 6.095 | 1.441 | 1.446 | 3.624 | 3.638 | 3.660 |
| Cotizaciones sociales | 67 | 2.082 | 2.480 | 576 | 584 | 1.538 | 1.549 | 1.565 |
| Impuestos indirectos | 199 | 6.169 | 7.341 | 1.718 | 1.734 | 4.470 | 4.496 | 4.534 |

Efectos en términos de Producción Miles de €

Tabla 10. Impacto de las inversiones en términos relativos (2014-2021)

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Total | 0,03% | 0,94% | 1,10% | 0,24% | 0,24% | 0,65% | 0,64% | 0,63% |
| Directos | 0,01% | 0,38% | 0,44% | 0,10% | 0,10% | 0,26% | 0,26% | 0,25% |
| Indirectos | 0,01% | 0,37% | 0,44% | 0,09% | 0,09% | 0,25% | 0,25% | 0,25% |
| Inducidos | 0,01% | 0,19% | 0,23% | 0,05% | 0,05% | 0,13% | 0,13% | 0,13% |

Efectos en términos de VAB (renta generada) % PIB

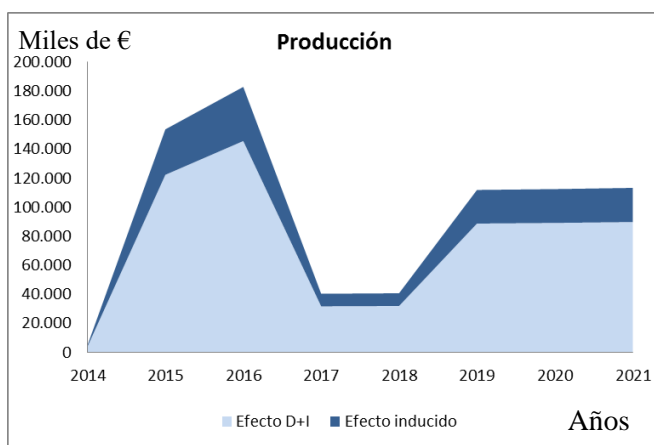
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Total | 0.02% | 0.49% | 0.58% | 0.13% | 0.13% | 0.34% | 0.34% | 0.33% |

Efectos en términos de empleo (necesidades unitarias) % Ocupados

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Total | 0.02% | 0.57% | 0.67% | 0.16% | 0.16% | 0.39% | 0.39% | 0.39% |

Efectos fiscales % PIB

| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Total | 0.004% | 0.111% | 0.131% | 0.030% | 0.030% | 0.076% | 0.076% | 0.075% |

Efectos en términos de Producción en % del PIB**Figura 3. Impacto de las inversiones en la Producción (2014-2021)****3.4 Efectos sobre el empleo**

En la Figura 5 se representa el impacto de las inversiones sobre el empleo.

Las necesidades unitarias de empleo para el periodo 2014-2016 (fase constructiva) se cifran en más de 4 100 puestos de trabajo. Cabe destacar que se trata de requerimientos unitarios de mano de obra por cada unidad producida; es decir, que el alineamiento de estas necesidades laborales con el volumen real de empleo generado finalmente dependerá básicamente del comportamiento del mercado de trabajo en España en ese momento.

Para la etapa de explotación, el detalle anual de empleo asociado al funcionamiento del

corredor ferroviario de altas prestaciones ofrece cifras de generación de empleo que oscilan, desde los prácticamente 500 empleos por ejercicio para los dos primeros años de explotación de la línea mejorada, hasta los 1 300 del periodo 2019-2021, resultantes del incremento de la demanda de transporte y particularmente de las nuevas inversiones de mejora del sistema logístico regional. En términos relativos, el volumen de empleo generado durante la fase de construcción de la línea Badajoz-Puertollano y de desarrollo del sistema logístico regional equivale al 1.26% del total de ocupados de Extremadura en 2013 y al 0.77% de la población activa (INE 2014c). Además de lo anterior, el ratio de empleo asociado al volumen de inversión efectuada asciende a un coste unitario de 39 000 euros por empleo generado en el periodo 2014-2016. La dinámica de empleo proyectada para Extremadura está representada por el número de ocupados del escenario macroeconómico de referencia (Figura 6). Durante la fase de construcción, el volumen de empleo adicional generado llega a representar en 2016 el 0.7% del total de ocupados de la región. En la fase de explotación, el impacto relativo baja al 0.4%.

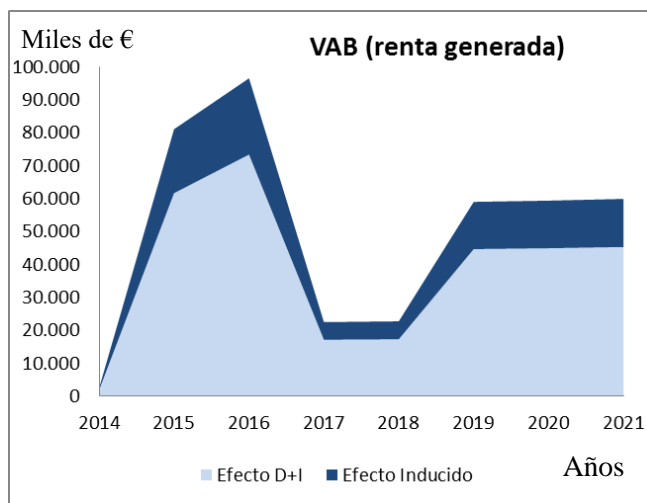


Figura 4. Impacto de las inversiones sobre el VAB (2014-2021).

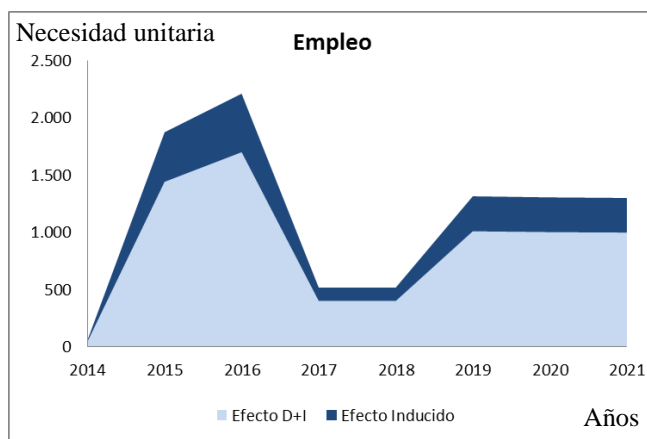


Figura 5. Impacto de las inversiones sobre el empleo (2014-2021).

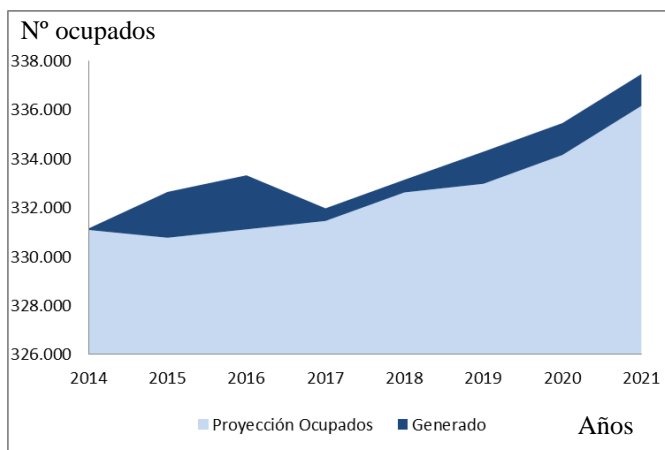


Figura 6. Generación adicional de empleo sobre escenario básico (2014-2021).

3.5 Efectos fiscales

Los retornos fiscales computados en el horizonte temporal de referencia (2014-2021) ascienden en conjunto a unos 90 millones de euros, desagregados de la siguiente forma: 45% durante la etapa de construcción y 55% durante el periodo de explotación. El ratio de retorno en forma de impuestos de las inversiones de adecuación del corredor ferroviario y del sistema logístico regional (2014-2016) se sitúa en 0.25; es decir, que cada euro invertido en la mejora de las prestaciones del Cofemanex genera un retorno fiscal de 25 céntimos de euro, incluyendo en dicho cálculo los impuestos, directos e indirectos, y las cotizaciones sociales de los empleos generados (trabajadores).

4. CONCLUSIONES

El libro blanco de la Comisión Europea (COM, 2011) establece una hoja de ruta para conseguir modelos de transporte que incrementen sus volúmenes de carga utilizando medios más eficientes y sostenibles. Entre su lista de iniciativas está la de realizar inversiones para ampliar o mejorar la capacidad de la red ferroviaria, ya que el ferrocarril es el medio de transporte terrestre que consigue mejores rendimientos y menores emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Este artículo analiza el efecto de la inversión realizada para acondicionar la línea convencional de ferrocarril Cofemanex como una línea de mercancías de altas prestaciones, que permita el traslado rápido y eficiente de las mercancías no sólo dentro de Extremadura, sino a través de la península ibérica y el resto de Europa. Los resultados obtenidos demuestran la rentabilidad de esta inversión ya que de cada 1 € que se invierte en acondicionar el Cofemanex, retorna en más de 2 euros al sistema productivo extremeño.

Además, en una región como Extremadura que sufre una alta tasa de paro (28.5%, INE 2014c), se hace muy necesaria la creación de los más de 4 100 puestos de empleo previstos en la construcción y puesta en servicio del corredor de mercancías. En los 5 primeros años de explotación del corredor también las previsiones de creación de empleo son altas

superando los 1 300 empleos/año. El retorno fiscal simulado también arroja datos positivos puesto que se prevé que en la fase de construcción del Cofemanex se recauden 25 céntimos de euro por cada euro invertido.

Por último, resulta necesario destacar que esta medición de impacto socioeconómico se limita a evaluar las consecuencias generadas por la nueva infraestructura sobre la estructura económica actualmente existente. No se han contemplado en el cálculo los crecimientos de la producción, la renta y el empleo ocasionados por la explotación de las nuevas oportunidades de negocio que el corredor ferroviario producirá por su mera existencia. Tampoco se incluye en esta cuantificación la evaluación de los efectos derivados del aumento de la productividad de las empresas gracias a la liberación del tiempo de trayecto en los desplazamientos, ni los efectos ligados al ahorro de costes externos (energía, siniestralidad vial, emisiones...) a consecuencia del trasvase de carga de la carretera al ferrocarril en escenarios futuros. Se demuestra así que el acondicionamiento del Cofemanex para adaptarlo a una línea de mercancías de altas prestaciones es una solución rentable, sostenible y muy necesaria para Extremadura.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo es fruto del Convenio de Colaboración entre la Consejería de Fomento de la Junta de Extremadura y la Universidad de Extremadura para “el desarrollo de un Proyecto de Investigación sobre la adaptación de la línea ferroviaria existente, Ciudad Real-Badajoz, en su trazado extremeño, a una línea de mercancías de altas prestaciones en Extremadura y el análisis de los efectos ambientales y socioeconómicos en la región extremeña”. También es necesario agradecer el trabajo y asesoría de Dr. Eladio Pascual Pedreño y la empresa española Consultrans.

REFERENCIAS

- ADMINISTRADOR DE INFRAESTRUCTURAS FERROVIARIAS, ADIF (2015). *Cobertura de la red convencional*. Informe de fiscalización de la financiación de las infraestructuras ferroviarias en el Periodo 2011-2013. Ministerio de Fomento. Gobierno de España. Madrid, p. 73.
- BANCO DE ESPAÑA, BE. (2015). *Boletín económico de marzo 2015*. Informe trimestral de la economía española. Madrid.
- COLOMA, J.F. (2015a). *Programación de la inversión. Aspectos ingenieriles y técnicos de la construcción de la línea ferroviaria de mercancías de altas prestaciones en Extremadura y su efecto en la competitividad económica extremeña*. Tesis Doctoral. Universidad de Extremadura. Cáceres (España), pp. 783-791.
- COLOMA, J.F. (2015b). *Estimación de la demanda potencial del Cofemanex. Aspectos ingenieriles y técnicos de la construcción de la línea ferroviaria de mercancías de altas prestaciones en Extremadura y su efecto en la competitividad económica extremeña*. Tesis

- Doctoral. Universidad de Extremadura. Cáceres (España), pp. 714-733.
- COMISIÓN EUROPEA, COM. (2011). *Anexo I: Lista de iniciativas. Libro Blanco. Hoja de ruta hacia un espacio europeo de transporte: por una política de transportes competitiva y sostenible*. Dirección General de Energía y Transporte. Bruselas (Bélgica), p.20
- INSTITUTO DE ESTADÍSTICA DE EXTREMA DURA, IEEX. (2013). *Proyecciones de población de Extremadura*. Gobierno de Extremadura. Badajoz (España).
- IES (2009). *Marco input-output actualizado a 2008*. Servicio de Estadística de Castilla- La Mancha. Gobierno de Castilla la Mancha. Toledo (España).
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, INE. (2014a). *Contabilidad regional 2008-2013*. Gobierno de España. Madrid.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, INE (2014b). *Encuesta de costes laborales*. Gobierno de España. Madrid.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, INE (2014c). *Encuesta de Población Activa*. Gobierno de España. Madrid.
- LEONTIEF, W. (1986). *An alternative to aggregation in input-output analysis. Input-output economics*. Oxford University Press. New York (USA), pp. 41-54.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2005). *Estudio socio-económico del transporte por carretera en España*. Gobierno de España. Madrid.
- MINISTERIO DE FOMENTO (2015). *Acotram 2.4. Asistente para el Cálculo de Costes del Transporte de Mercancías por Carretera*. Gobierno de España. Madrid.
- UE (2013). *Reglamento (UE) N° 1316/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo de 11 de diciembre de 2013 por el que se crea el Mecanismo «Conectar Europa»*.
- TARANCÓN, M.A. (2003). *Análisis Input-Output: enfoques y técnicas. Técnicas de análisis económico input-output*. Club universitario. Alicante (España), pp. 37-48.

32 Análise dos investimentos para o desenvolvimento do arco norte brasileiro com uma matriz rodo-hidroviária

Eliezé Bulhões de Carvalho

Bruna Renata Cavalcante de Barros

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasil

Tafarel Carvalho de Gois

Programa de Pós-Graduação em Transportes, Brasil

Geraldo Magela Leite Junqueira

CGG Trading S.A., Brasil

Graziela Moura Araújo

Tharcia Suelen Vasconcelos Silva

Programa de Pós-Graduação em Transportes, Brasil

RESUMO

Este trabalho visa elaborar uma análise dos principais entraves ao desenvolvimento do transporte hidroviário no norte do Brasil, sejam eles relacionados à infraestrutura ou à burocracia imposta pelos agentes governamentais envolvidos no processo, relacionando os custos em investimentos operacionais, de implementação da estação de transbordo de carga de terminal de uso privado e das embarcações utilizadas no modal. Além disso, este artigo apresenta o levantamento dos gases de efeito estufa liberados pelos modais rodoviário e hidroviário.

Palavras chave: Hidrovias, Arco Norte, Análise de investimentos, Estações de transbordo

1. INTRODUÇÃO

O processo histórico de colonização brasileiro e a redução de investimentos ocorridos nos projetos de infraestrutura de transportes no Brasil impactaram no desenvolvimento de uma matriz de transporte desbalanceada, e conseqüentemente geraram custos adicionais, perda de competitividade, aumento nos tempos das viagens e subutilização da navegabilidade das principais hidrovias do País.

Segundo o Ministério dos Transportes (MT) (MT, 2013), o Brasil, em toda sua extensão, possui sessenta e três mil quilômetros distribuídos em doze bacias hidrográficas, nas quais quarenta e dois mil quilômetros de rios com potencial navegável. Dados oficiais do MT revelam que somente vinte mil quilômetros são utilizados para transporte de carga, nos quais

os portos têm limitações aos acessos marítimos, restrições ao acesso terrestre, deficiências de retroáreas e berços, restrições de calado, deficiências de sinalização e balizamento, e muita limitação à navegação devido à inexistência de eclusas.

Com a produção se deslocando cada vez mais para o norte, surge a opção do Arco Norte, no qual o transporte hidroviário, conjugado com outros meios de transporte, será a solução mais econômica para o escoamento desta produção agrícola localizada no norte de Mato Grosso e sul do Pará. Contudo, para ser via navegável, o Rio Tapajós-Teles Pires necessita resolver alguns trechos com obstáculos, tais como a dependência da construção de eclusas para a transposição de cachoeiras. Resolvendo estes obstáculos, é possível percorrer mais de 1,700 quilômetros navegáveis (Carvalho e Huguet, 2013).

2. METODOLOGIA

O presente artigo expõe uma análise sobre os gargalos logísticos de escoamento da produção agrícola a partir da utilização intermodal da saída pelo Arco Norte do Brasil, que compreende os Estados da Região Norte, o Mato Grosso e Maranhão. Desta forma, pretende-se demonstrar os impactos positivos na cadeia do agronegócio brasileiro, tanto em competitividade, como em custos de fretes e em ordenamento físico, pois a região necessita de um programa específico de investimentos.

O estudo econômico-financeiro da implantação de um sistema de escoamento de grãos através do Arco Norte, via rio Tapajós no estado do Pará, será premissa básica desse artigo, e os seus impactos nas principais comunidades envolvidas, como Itaituba e seus distritos localizados à margem direita do rio Tapajós, e Vila do Conde (Barcarena), situada no rio Pará. Um estudo de infraestrutura também será apresentado, englobando os terminais, as embarcações e os demais itens necessários para implantação de todo o processo.

Para tanto, foram coletados dados relacionados a implantação, custo de transporte e de operação na própria região e dados vinculados aos Ministérios referentes. Após o levantamento dos dados de custo e investimento, tanto de logística quanto de infraestrutura, foram realizadas análises, a fim de saber qual a maneira mais econômica e eficiente de se estabelecer o projeto.

O estudo avaliará os custos logísticos para o escoamento da safra agrícola pela fronteira norte do Brasil, listando a cadeia de legados e benefícios considerando os custos logísticos para o escoamento da safra agrícola da região norte do Brasil, por meio das hidrovias integradas aos outros modais de transportes, principalmente o rodoviário.

3. A VIA NAVEGÁVEL DO TAPAJÓS, TELES-PIRES E ARINO

Será objeto do estudo de caso a implantação de polo de transbordo hidro rodoviário Estação de Transbordo de Cargas – ETC – às margens do rio Tapajós, município de Itaituba (PA), a construção e transporte de grãos através de dois comboios compostos de 12 barcaças e um empurrador cada, e mais os custos da elevação da carga em um porto marítimo na região de Barcarena (PA) e Santana (AP).

Neste artigo, o termo via navegável será dividido em duas partes: aquela que está no alto e médio Tapajós, cuja navegabilidade necessita de obras em cachoeira, corredeiras e há alguns barramentos; e o baixo Tapajós, localizado a jusante da futura Hidrelétrica de São Luiz do Tapajós, que possui 345 km de extensão até a foz do Tapajós, próximo a cidade de Santarém, onde encontra o Rio Amazonas, com navegabilidade o ano todo.

O rio possui uma velocidade de escoamento das águas relativamente pequena, permitindo economia no consumo de combustível, agilidade e baixo risco de acidentes. É importante ressaltar que a Hidrelétrica de São Luiz do Tapajós irá alterar a navegabilidade nesse trecho, mas não de forma significativa que inviabilize a implantação da hidrovia e terminais.

A cidade de Itaituba dista somente 20 quilômetros do futuro polo hidroviário, e é servida de infraestruturas rodoviárias e aeroporto com voos diários ligando aos grandes centros urbanos; a navegação com barcaças partindo da região de Itaituba poderá atender o Porto de Santarém e Santana, os portos da região de Belém e Barcarena, que permite o ingresso de navios de até 85 mil toneladas de peso (DWT), gerando economia no transporte e agilidade.

3.1 A Nova Fronteira Agrícola Nacional

A produção de grãos no norte do Brasil, notadamente no estado do Mato Grosso, possui uma saída pelo porto da cidade de Porto Velho (RO), pelo Rio Madeira, de onde segue até Itacoatiara (AM), Santarém (PA), Santana (PA) ou Barcarena (AP), onde a carga é transferida para navios oceânicos.

Santarém recebe também, por via rodoviária através da rodovia BR-163, parte da produção do Mato Grosso, que é escoada pelo porto da cidade. No entanto, a ausência da pavimentação asfáltica na totalidade da rodovia tem elevado substancialmente os preços dos fretes. Além disso, não existe um terminal público que possa atender a demandas de todos os interessados. Hoje, somente a Cargill Agrícola é arrendatária de um terminal no local.

Santana sofre pela escassez de investimentos na sua expansão, pois possui dois berços que operam, basicamente, subprodutos da madeira, combustível, cargas gerais e desde o mês de março de 2015 também grãos. Na Bacia Amazônica, a pesquisa indica a viabilidade da construção da hidrovia Teles Pires-Tapajós para escoar a safra agrícola da região Norte de Mato Grosso. Conforme a pesquisa, a futura hidrovia “deve tornar-se a melhor rota para o

escoamento de grãos do Centro-Norte do estado de Mato Grosso após a total implantação” (Aprosoja, 2012).

O MT autorizou a inclusão, no PAC 2 (MPOG, 2011), do Estudo de Viabilidade Técnica, Econômica e Ambiental (EVTEA) das hidrovias Teles Pires-Tapajós e Juruena-Tapajós, com início ainda este ano 2011. Serão investidos aproximadamente R\$ 13 milhões nos estudos necessários para conhecer de fato todas as viabilidades de exploração das duas hidrovias. Além do EVTEA, foi autorizado as obras de dragagem, derrocagem e sinalização no rio Tapajós, no trecho entre Santarém a Miritituba, e a construção do porto público em Miritituba.

As hidrovias ligarão as regiões Centro-Norte e Noroeste de Mato Grosso até os portos do Pará (Santarém e Belém), agilizando e desonerando o escoamento da produção agropecuária dessa região. A hidrovia Teles Pires-Tapajós sai de Sinop e chega até Santarém, com 1.576 km de extensão. Já a hidrovia Juruena, Arinos-Tapajós, sai de Porto de Gaúchos até Santarém, e também tem aproximadamente 1.500 km.

Desde a explosão na produção de grãos na região mais ao norte do Brasil e a expectativa de finalização da BR-163, surgiu uma contagiante euforia dos empresários, tanto dos produtores rurais e tradings para implantação de terminais de transbordos de cargas, portos de usos privativos; como também nos estaleiros, com expectativas de construção de embarcações, empurradores e barcaças.

Hoje o acesso à região norte se faz por via rodoviária até as margens dos grandes rios, alguns com infraestrutura portuária e outros não. Deve-se enfatizar a existência de quatro portos com capacidade de receber navios oceânicos; Manaus, Santana, Itacoatiara e Santarém, que operam com linhas de transporte de longo curso, e por isso, são considerados portos oceânicos, mas que apresentam a restrição do calado - calado máximo entre 9 e 11 metros-, em decorrência da passagem da Barra Norte, na foz do Rio Amazonas.

Com a rodovia BR-163 concluída, a melhor opção para utilização dos recursos hidroviários será o Rio Tapajós, na adjacência da cidade de Itaituba (PA), em especial por sua ligação com a rodovia (BR 230), admitindo acesso à margem direita do rio, cujas características físicas são ideais ao acesso rodoviário. Nesta região, serão implantadas as Estações de Transbordo de Cargas que se caracterizam pela capacidade de recepção dos caminhões, descargas e estocagem e, posteriormente, pela transferência para as barcaças que deslocarão até os portos oceânicos, mencionados.

Outra cidade que apresenta a melhor opção de escoamento dos grãos produzidos no Mato Grosso, Tocantins e Pará é a cidade de Barcarena (PA), devido a sua localização, em águas mais profundas, que permite o ingresso de embarcações oceânicas com calados e capacidades maiores, melhorando o ganho de escala, e no futuro receberá um ramal da

Ferrovia Norte Sul que interligará todo o sul do Brasil às hidrovias do Norte; porém hoje a integração se faz por rodovia.

A maior demonstração de interesse na busca de soluções, pelo Governo Federal surgiu com a promulgação das alterações da lei dos portos instituindo um novo marco regulatório – Lei 12.815, de 05 de junho de 2013. No entanto, as modificações na legislação federal provocaram uma paralisação em todos os investimentos programados, e todos aguardam os esclarecimentos de pontos obscuros da lei. Além da alteração da legislação, outros aspectos perturbaram o furor de investimentos na região, em especial os obstáculos ambientais, não pelo rigor da legislação, mas sim pela morosidade de se obter decisões conclusivas.

3.2 O potencial de escoamento das cargas pelo Arco Norte

Basicamente, no estado do Mato Grosso existem cinco canais de escoamento da produção agrícola, conforme apresentado na Tabela 1.

Com base em estudos promovidos pelo Instituto Mato-Grossense de Economia e Agropecuária (IMEA), verifica-se uma expressiva alteração nas áreas de influência dos portos brasileiros no escoamento da produção do estado do Mato Grosso entre os anos de 2011 (Figura 1) e 2022 (Figura 2), sendo que os terminais da região de Porto Velho praticamente manterão a mesma área de influência (APROSOJA, 2012).

Com o Porto de Itaquí há uma ampliação significativa, saindo de 1% e alcançando 23%. Por outro lado, remanescerá menos de 36% do estado com influência dos portos do Sul – Santos, Paranaguá e Vitória – que será transferida para os terminais do Rio Tapajós em Itaituba e por Santarém (Tabela 2).

Tabela 1. Canais de escoamento de Produção no Mato Grosso

| | | |
|-----|-----------------------------------|----------------------|
| I | Santos/Paranaguá/Vitória | → Rodovia e ferrovia |
| II | Porto Velho/Itacoatiara /Santarém | → Rodovia e hidrovia |
| III | Santarém | → Rodovia |
| IV | São Luís (Itaquí) | → Rodovia e ferrovia |
| V | Itaituba /Vila do Conde/Santana | → Rodovia e hidrovia |

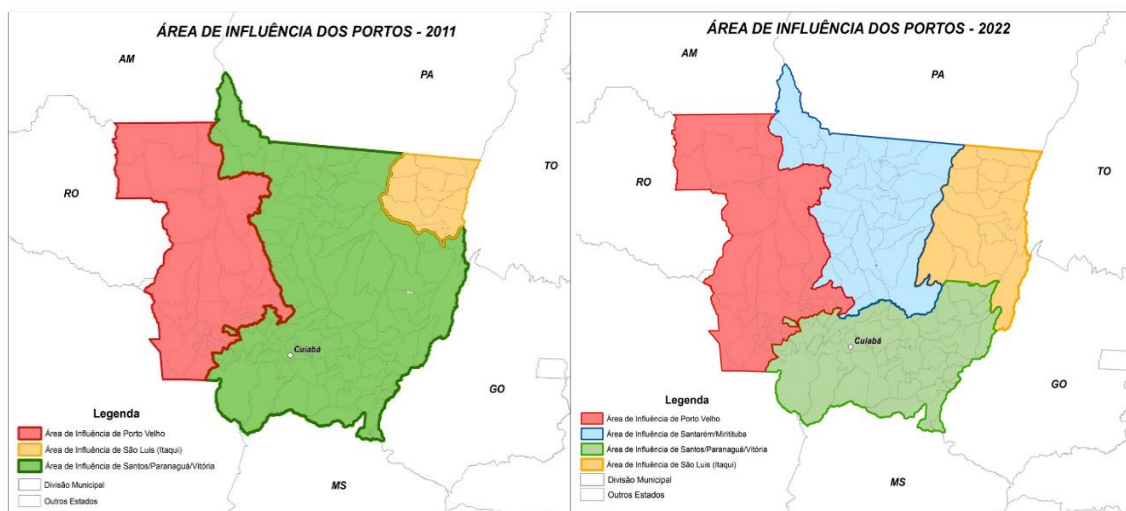


Figura 1. Área de Influência dos Portos 2011

Figura 2. Área de influência dos portos 2022

Tabela 2. Corredores de exportação – 2011, 2022

| Porto | Ano – 2011 | | Ano– 2022 | |
|------------------------------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| | Toneladas | Participação (%) | Toneladas | Participação (%) |
| Porto Velho | 4,829,275 | 27% | 11,742,015 | 23% |
| Santarém-Miritituba | | | 18,328,862 | 36% |
| Santos – Paranaguá – Vitória | 12,921,422 | 72% | 18,007,853 | 36% |
| São Luís | 98,804 | 1% | 2,408,263 | 5% |
| Total | 17,849,501 | 100% | 50,486,993 | 100% |

Fonte: APROSOJA, 2012

3.3 Impactos ambientais

A profundidade do estudo de impacto ambiental na região não será objeto do estudo, mas os impactos preliminares do trecho da hinterlândia da Hidrovia Tapajós-Teles Pires merecem breves comentários.

3.3.1 Movimento de veículos

Com a premissa de 4 milhões de toneladas de grãos movimentada no empreendimento, por ano circularão mais de 100,000 caminhões distribuído em 10 meses, o que representará 10,000 veículos pesados em duplo trânsito (ida e volta), sem considerar aqueles de serviços complementares, tais como veículos de pequenos portes, transporte de combustíveis para atender a demanda, etc.

Na vizinhança desse do estudo de caso, existem, pelo menos, outros cinco similares que terão demandas idênticas; ou seja, em um ano o fluxo poderá alcançar mais de 600.000 caminhões. Considerando exclusivamente os veículos pesados utilizados no transporte de carga, haverá uma emissão de 42,885 milhões de toneladas de poluentes na região de influência do projeto, que alcança mais de 1.000 quilômetros de raio. Não há uma elevação na emissão de poluente, pois, praticamente, essa emissão já estava presente na região centro-oeste e sudeste, uma vez que a carga atualmente segue para os portos dessa região (Tabelas 3 e 4).

Os aspectos ambientais do transporte hidroviário possibilitam a redução das emissões de gases poluentes causadores do efeito estufa. Dados do Plano Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) (MMA, 2008) corroboram, através de parâmetros numéricos, na afirmativa, que o modo hidroviário permite uma maior eficiência energética, menor consumo de combustível, menores quantidades de emissões e maiores ganhos ambientais.

O resultado da comparação entre os modais rodoviário e hidroviário aponta que, de forma geral, este modal apresenta eficiência energética (relação carga/potência) 29 vezes superior, um consumo de combustível 19 vezes menor, além de emitir 6 vezes menos CO₂ e 18 vezes menos NO_x (ANTAQ, 2013). As hidrovias, comparativamente com os outros modais, obtêm índices de desmatamento para a implantação quase zero, diferentemente dos outros modais de transporte.

Tabela 3. Emissão de Poluentes por Veículos Pesados (10³)

| Emissões (10 ³ t/ano) | | | | | |
|----------------------------------|---------------|--------------|-----------------|-------------|-------------|
| Categoria | CO | HC | NO _x | RCHO | MP |
| Automóveis | | | | | |
| Gasolina | 109.85 | 11.16 | 4.78 | 0.17 | |
| Etanol | 32.22 | 3.56 | 2.20 | 0.22 | |
| Bicombustível | 1.53 | 0.35 | 0.23 | 0.04 | |
| | | | | | |
| Veículos Comerciais leves | | | | | |
| Gasolina | 17.55 | 1.76 | 0.69 | | |
| Etanol | 4.09 | 0.46 | 0.29 | | |
| Bicombustível | 0.18 | 0.04 | 0.03 | | |
| Diesel | 15.34 | 2.59 | 9.22 | | 0.55 |
| | | | | | |
| Veículos Pesados | 47.56 | 8.03 | 28.47 | | 1.71 |
| | | | | | |
| Motociclistas | 16.03 | 2.26 | 0.43 | | |
| | | | | | |
| Total | 244.35 | 30.21 | 46.35 | 0.43 | 2.26 |

Fonte: ANTAQ, 2013

Tabela 4. Emissão de Poluentes por Veículos Pesados (10³)

| | |
|--------------------------------|------------|
| Média anual de emissão veículo | 85.77t |
| Quantidade veículos | 600.00 |
| Período de ano – meses | 10.00 |
| Total de emissão na região | 42,885.00t |

Fonte: ANTAQ, 2013

Tabela 5. Comparativo de desmatamento para implantação

| | |
|----------|---|
| Hidrovia | 0 |
| Ferrovia | 38,358 m ² por quilometro implantado |
| Rodovia | 40,000 m ² por quilometro implantado |

Fonte: ANTAQ, 2013

4. DESCRIÇÃO DAS INFRAESTRUTURAS HIDROVIÁRIAS

As planilhas deste estudo apresentam análises de investimentos para implantação do terminal de transbordo rodo-hidroviário e embarcações, custos operacionais – fixos e variáveis – para as atividades, ganhos econômicos de cada atividade e, também, o resultado da alteração das logísticas, ou seja, a inversão de fluxo dos portos do Sul para os da região Norte e a necessidade da implantação de uma estrutura para o uso das hidrovias.

4.1 Embarcações

Os dados apresentaram as estimativas de movimentação com as suas respectivas rampas de crescimento, assim como a receita operacional por toneladas e total no exercício; também, os custos operacionais por grandes itens, mantendo as condições para análises, da mesma maneira que as despesas administrativas. E, sequencialmente, o investimento total será detalhado por etapa, com estimativas de custos de financiamentos, amortizações e depreciações, chegando ao resultado final com um fluxo de capital – EBTIDA – quando será calculada a taxa interna de retorno (TIR).

4.2. Estação de Transbordo de Carga – ETC

Da mesma maneira que o Demonstrativo de Embarcações, este demonstrará as expectativas de atividades com volumes programados anualmente. Para melhor análise, será mantida a mesma estrutura em todas as planilhas, destacando receitas, custos, despesas, depreciações, EBTIDA, fluxo financeiro e taxa de retorno.

4.3 Terminal de Uso Privado – TUP

Normalmente, é um terminal com capacidade de embarcações oceânicas ou menores, porém com capacidade de promover a exportação. Ou seja, a carga é considerada em condições de exportação. É um porto alfandegado e autorizado pelos demais órgãos de controles brasileiros.

Em todas as três atividades não há restrição legal para o uso compartilhado com outros players. Assim sendo, os gastos poderão ser minimizados com o rateio entre os diversos usuários, gerando um aproveitamento mais racional do investimento.

O maior obstáculo na implantação de TUP é a aquisição do imóvel às margens dos rios e mares, que respeite a profundidade de acesso das embarcações e possua área abrigada para fundeio, manobras e segurança (SEP/PR, 2013). Adicionalmente, existem as diversas licenças – ambientais, técnicas, operacionais (Receita Federal, Marinha, Polícia Federal, ANTAQ, Secretaria de Patrimônio da União, Secretaria de Fazenda municipal e estadual, etc.).

Nesses tipos de empreendimentos percebe-se a visão atrasada dos órgãos envolvidos, incluindo os Ministérios Públicos e as diversas organizações não governamentais (ONGs), apregoando os malefícios do projeto e omitindo os seus benefícios para o país e para as comunidades. Desta forma, surgem vários problemas para os empresários que se dispõem a investir nos projetos, com riscos elevados pela instabilidade jurídica das normas na busca da solução para o escoamento da produção agrícola (Carvalho e Huguet, 2013).

5. ANÁLISES DO ESTUDO ECONÔMICO-FINANCEIRO

As planilhas contemplarão os estudos de custos operacionais, investimentos de implantação e resultados das três etapas – Terminal de Uso Privativo (TUP), Equipamentos de Transporte Hidroviário-Embarcações e Estação de Transbordo de Cargas (ETC).

5.1 Terminal de Uso Privado - TUP

O porto privado, denominado pela legislação vigente de Terminal de Uso Privativo (TUP), surge como alternativa para escoamento dessa expressiva produção de grãos, pois a região não está dotada de portos públicos ou mesmo privados com capacidade de movimentar tais volumes. A tecnologia a ser utilizada deverá atender a demanda para descarga das barcas e o carregamento dos navios, em velocidades compatíveis com o programa. Também deverá fazer parte do complexo portuário armazéns graneleiros ou silos, para estocagem de grãos, cujos custos estão estimados na Tabela 6.

O investimento no TUP será recuperado em pouco tempo pelas estimativas de movimentação, e trará e fechará o ciclo da exportação. Existem na região áreas a serem melhores estudadas na adjacência da cidade de Barcarena (PA), onde alguns *players* do setor agrícola já estabeleceram seus terminais, e outros estão sendo planejados para o local. A localização decorre de fatores técnicos e econômicos, com destaque para:

- Localização abrigada e próxima de regiões para apoio;
- Acesso facilitado ao canal de Breves, que conduz a região dos rios Amazonas e Tapajós;
- Águas profundas para permitir o acesso de grandes navios;

- Menor distância entre o ponto de partida no rio Tapajós e a saída para o oceano;
- Possibilidade de receber cargas oriundas de outras regiões por via terrestre ou aquática, em especial pela Hidrovia do Tocantins/Araguaia e acesso pela Ferrovia Norte Sul.

5.2 Embarcações

A conexão dos dois pontos de transbordo – ETC e TUP – será efetuada pelas embarcações que deverão transportar toda a carga pela hidrovia, fazendo um trajeto de aproximadamente 1.128 quilômetros em 10 dias, por comboio de 33 mil toneladas cada, compostos de 12 barcaças e um empurrador. Os equipamentos serão projetados com engenharia consolidada na região e capacidade de operação durante todo o ano com carga total, e com volume de transporte de até dois milhões de toneladas anuais, de acordo com a Tabela 7.

5.3 Estação de Transbordo de Cargas - ETC

Possuem capacidade de estoque de grãos de 60.000 toneladas em silos verticais, são dotadas de plataformas de descargas de caminhões, com potencial para movimentação de até 250 caminhões/dia; há balanças rodoviárias na recepção e balanças de batelada (fluxo) na expedição para as barcaças, área de apoio aos motoristas e transportadoras e sistema de controles de acessos e vigilância. Concebeu-se o projeto básico com custos apresentados na Tabela 8.

Tabela 6. Investimentos no TUP

| Orçamento – TUP (valores em mil dólares – base R\$2,40) | |
|--|------------------|
| Terreno | \$4,167 |
| Obras Civis-Terra | \$4,167 |
| Armazéns Completo (120 kton) | \$25,000 |
| Equipamento Transportes p/ Cais | \$7,083 |
| Shiploader | \$6,667 |
| Berço e Demais obras Água | \$39,583 |
| Balanças de Fluxo | \$833 |
| Serviços Diversos – Ambiental | \$1,250 |
| Descarregador de Barcaças | \$14,583 |
| Contingenciamento | \$5,000 |
| Investimento total | \$104,167 |

Tabela 7. Orçamento embarcações

| Orçamento – Embarcações (valores em mil dólares – base R\$2,40) | |
|--|------------------|
| Barcaças Tipo Central | \$ 11,783 |
| Barcaças Tipo Proa | \$ 23,567 |
| Empurradores – Principais | \$ 15,000 |
| Investimento total | \$ 50,350 |

Tabela 8. Orçamento ETC

| Orçamento – ETC (valores em mil dólares – base R\$2,40) | |
|--|-----------------|
| Terreno | \$2,167 |
| Serviços Gerais | \$773 |
| Canteiro de Obras | \$619 |
| Movimento de Terra – Obras Cíveis | \$398 |
| Base de Balanças Rodoviárias | \$2,132 |
| Moedas e Tombadores | \$1,293 |
| Bases de Balanças Rodoviárias | \$80 |
| Bases de Torres Transf. Balança Fluxo | \$352 |
| Galpão de Classificação de Grãos | \$236 |
| Tuneis dos Transportadores | \$281 |
| Embarcador – Expedição | \$2,175 |
| Edificações | \$169 |
| Equipamentos Eletromecânicos | \$6,740 |
| Terraplanagem e Arruamento | \$485 |
| Serviços Diversos | \$2,304 |
| Investimento total | \$20,202 |

5.4 Estação Flutuante de Transbordo de Cargas

Em decorrência da carência de áreas para implantação de terminais portuários, a utilização de terminais flutuantes surge como uma alternativa viável e ágil. No entanto, com o advento das novas regras dos portos (Brasil, 2013a e 2013b) existem dúvidas quanto à validade destas regras da ANTAQ. Pelas pesquisas preliminares, o terminal flutuante poderia operar em áreas já indicadas pela Marinha do Brasil, e, pelas referidas normas, a Estação Flutuante de Transbordo de Cargas (EFTC) só poderia ser instalada em águas interiores, ou seja, em rios, lagos e lagoas.

A implantação poderia ocorrer na região de Vila do Conde (PA), nas proximidades do Porto de Santana (AP) e na foz do rio Tapajós, nas adjacências de Santarém (PA). Este tipo de transbordo tem uma vantagem adicional de permitir o seu deslocamento para os locais mais adequados somente alterando o seu sistema de travamento (ancoragem). A estação de transbordo será implantada com a utilização da estrutura de um navio tipo Panamax, e requererá instalações de plataformas laterais para atracação de barcaças carregadas de produtos. No lado oposto, terá as condições para a chegada e carregamento dos navios.

5.5 Consolidação de Investimentos

Buscando no mercado e consultando armadores, construtoras e fabricantes de equipamentos, foi possível criar uma matriz de custos e investimentos para todos os projetos. O projeto global exigirá um investimento total de US\$ 175 milhões (Tabela 9), a ser desembolsado em prazo relativamente curto, mas terá todas as chances de obtenção de financiamento nos

diversos agentes financeiros – Banco do Brasil, Banco da Amazônia, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), Fundo da Marinha Mercante e outros.

O calado da embarcação também tem função importante na influência do frete na hidrovia. Quanto maior o calado, maior a quantidade de carga no comboio. Isto significa que, caso haja demanda, a receita aumenta mais em relação ao custo da embarcação. Outra opção seria associação de empresas com interesses similares. Com isto, haveria uma expressiva redução dos investimentos, e os equipamentos poderiam ser otimizados, ou seja, teriam um uso mais intenso de toda a infraestrutura, evitando-se momentos de ociosidade.

A Taxa Retorno (TIR) ficou acima do que usualmente se pratica para esse tipo de investimento para as instalações portuárias, e no caso das embarcações um pouco abaixo, considerando uma taxa de oportunidade de 12% ao ano (Tabela 11).

Tabela 9. Resumo de custos e resultados Projeto hidroviário integrado

| Investimentos | ETC – transbordo | TUP – porto | Embarcações | Total geral |
|------------------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------------|------------------------|
| Inversão total | 20,120 | 104,166 | 50,000 | 174,286 |
| Recurso próprios | 4,024 | 20,833 | 10,000 | 34,857 |
| Financiamento | 16,096 | 83,333 | 40,000 | 139,429 |
| Resultados financeiros | ETC – Transbordo | TUP – Porto | Embarcações | Total geral |
| Receita Líquida | 7,628 | 32,041 | 40,712 | 80,381 |
| Custos Operacionais | 6,878 | 7,431 | 22,992 | 37,301 |
| Resultados antes da depreciação | 11,428 | 24,609 | 17,720 | 53,575 |
| Depreciação | 3,374 | 5,208 | 3,655 | 12,607 |
| Resultado antes do I, Renda | 15,162 | 19,401 | 14,054 | 48,617 |

Valores: US\$ 1.000. US\$ 2,40 (Data base 09/2014). Os parâmetros econômico-financeiros que foram utilizados para cálculos de receitas e despesas estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Parâmetros de cálculos

| Parâmetros Utilizados de Cálculos | |
|--|----------|
| TIR (Mínima) | 10% aa |
| Taxa de Desconto (oportunidade) | 12% |
| Utilizado Perpetuidade investimento | Sim |
| Correção Monetária | 0% |
| Taxa de Juros Financiamento | 7,62% aa |
| Prazo de Financiamento | 12 anos |
| Carência do Financiamento | 2 anos |
| Manutenção (investimento) | 1,60 % |
| Depreciação | 20 anos |
| ISS | 5% |
| PIS/ Cofins | 9,25% |
| Imposto Renda - CSSL | 34% |
| Ano Base | 2024 |
| Valor dólar Referencial | R\$ 2,40 |

Tabela 11. Taxa de Retorno

| | |
|---------------------------------------|--------|
| Embarcações | 10.74% |
| Terminal de Uso Privado (TUP) | 18.08% |
| Estação de Transbordo de Cargas (ETC) | 13.28% |

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Efetuada as análises, infere-se que investimentos nas hidrovias são importantes para diminuição dos custos logísticos brasileiros, principalmente pelo fato de o Brasil ser um dos maiores exportadores de *commodity* do mundo e necessitar de uma logística que privilegie o transporte por outros modos diferentes do rodoviário. Após avaliação dos resultados, percebe-se que investimentos no setor são rentáveis em face à taxa de retorno, mesmo o setor ainda sofrendo com pontos ainda não claros da Lei do Portos.

No que tange as questões ambientais, o transporte hidroviário apresentou resultados melhores que o modal rodoviário em comparação realizada de eficiência energética, emissão de CO₂ e de NO_x.

Em relação aos entraves relacionados aos agentes públicos, notou-se a necessidade de um sistema que englobe e gerencie a necessidade documental relacionada à implementação de TUP, de forma que seja possível equacionar a demanda da Receita Federal, Marinha do Brasil, ANTAQ e outros órgãos anuentes de uma só vez, a fim de dar celeridade ao processo.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS, ANTAQ (2013). *PNIH – Plano Nacional de Integração Hidroviária*.
- APROSOJA (2012). *Análise da produção de carga do Estado do Mato Grosso*. Associação dos Produtores de Soja e Milho do Estado do Mato Grosso.
- BRASIL (2013a). *Lei 12.815: Dispõe sobre a exploração direta e indireta pela União de portos e instalações portuárias e sobre as atividades desempenhadas pelos operadores portuários*.
- BRASIL (2013b). *Decreto nº 8.033: Regulamenta o disposto na Lei no 12.815, de 5 de junho de 2013, e as demais disposições legais que regulam a exploração de portos organizados e de instalações portuárias*.
- CARVALHO, E. e HUGUET, C. (2013). *Obstáculos às Vias Navegáveis Interiores: a Barragem da Judicialização Não Tem Eclusas*. Revista Direito Aduaneiro, Marítimo e Portuário, pp. 120-135.
- MINISTÉRIO DO PLANEJAMENTO, MPOG (2011). *Programa de Aceleração do Crescimento 2*. Brasília.
- MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA (2008). *Plano Nacional de Mudanças Climáticas*. Brasília.
- MINISTÉRIO DOS TRANSPORTES, MT (2013). *Plano Nacional de Logística de Transportes (PNLT)*. Brasília.
- SECRETARIA ESPECIAL DE PORTOS/ PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, SEP/PR (2013). *Plano Nacional de Logística Portuária*. Brasília.

33 Modelación de elección portuaria: un enfoque de autómatas celulares probabilísticos

Mabel Leva

Universidad de Cantabria, España

Alejandro León

Rodrigo A. Garrido

Universidad Diego Portales, Chile

Ángel Ibeas

Universidad de Cantabria, España

RESUMEN

La elección portuaria es un proceso dominado por múltiples variables y actores, que dificultan su modelación con técnicas estándar como los modelos de elección discreta. Una de las razones que explican la incapacidad de estos métodos para predecir el comportamiento futuro es la característica de sistema complejo que se observa en este proceso. En esta investigación se utiliza una herramienta que ha demostrado ser de gran capacidad predictiva y descriptiva de sistemas complejos: la teoría de autómatas celulares (AC). Estos modelos logran captar con facilidad interacciones espacio-temporales que en otros contextos de modelación son extremadamente difíciles de incorporar y calibrar. Se presenta un modelo de asignación portuaria basado en un autómata celular probabilístico, que busca imitar la decisión de múltiples actores que interactúan entre sí y que ponderan una multiplicidad de aspectos y comportamientos espaciales que configuran una elección dinámica. La especificación del AC es aplicada a la exportación de automóviles en Brasil y se calibra utilizando un algoritmo genético. Los resultados muestran que el modelo logra replicar con un alto porcentaje de aciertos el comportamiento dinámico de la elección, obteniéndose que el parámetro espacial, asociado a la componente de vecindad del autómata, es significativo al igual que el correspondiente a las características y ubicación de los puertos analizados.

Palabras clave: Elección portuaria, autómatas celulares, modelos de elección.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

Más del 85% de las mercancías movilizadas globalmente utilizan el transporte marítimo como modo principal. Esta característica parece ser una tendencia de largo plazo al observar los tamaños de naves que se utilizan para el transporte marítimo. Estas tendencias han ido

de la mano con mejoras en la capacidad de transferencia de los puertos y en la profesionalización de todos los servicios requeridos por estas embarcaciones.

Dado el escenario anterior, la planificación portuaria hoy en día requiere de un estudio prospectivo de la utilización de los distintos nodos portuarios de una red para mantener un balance eficiente de capacidad de transferencia, minimizar costos y mantener las externalidades negativas bajo control.

La proyección de demanda por transporte de mercancías, fundamental para la planificación portuaria, es típicamente incorporada en los programas maestros de desarrollo de los puertos. Tradicionalmente, en la práctica se realiza un estudio del mercado potencial del puerto en función de los distintos orígenes/destinos de carga de los puertos considerados como competencia. Así, la demanda de estos puertos se proyecta con base a tasas mundiales de crecimiento del PIB para un cierto horizonte de planificación.

La distribución de mercancías entre los distintos puertos que compiten suele realizarse de acuerdo a un modelo que asume que la elección de puerto depende esencialmente de los costos (generalizados) de transporte de mercancías entre el puerto y el origen o destino final dentro del “hinterland”. De esta forma se estima un porcentaje de captura que tendría el puerto bajo estudio sobre los flujos totales de los puertos de la red relevante. Estos valores son luego sensibilizados con distintos factores de captura.

Hay otros estudios, en los que el enfoque de elección es realizado desde el punto de vista de la naviera y no del expedidor de carga. En estos casos, la tarifa y variables de servicio de los puertos, se vuelven las variables fundamentales.

En ambos casos, estas son sólo algunas de las variables que entran en juego en la elección. En efecto, variables tales como la capacidad negociadora, especialización en un tipo de mercancía, contratos de largo plazo, integración comercial, son factores relevantes en la captura del mercado y son de muy difícil predicción.

1.2 Descripción del problema

El problema consiste en el desarrollo de un modelo de elección portuaria por parte de los expedidores, en el que se consideran variables vinculadas a los puertos correspondientes al conjunto de elección, así como la influencia que tiene la decisión de un expedidor sobre otro que se encuentra espacialmente cercano (interacción espacial).

La hipótesis referente a la influencia que tienen las decisiones de los expedidores entre sí, se respalda en la evidencia empírica, respecto a que expedidores de mayor tamaño influyen en la decisión de puerto de recalada de las naves, generando así condiciones de servicios nuevos y mayor capacidad de negociación con las navieras.

Al gatillarse nuevos servicios navieros, se generan a su vez mejores condiciones de negociación para exportadores más pequeños y por lo tanto, muchos de ellos seguirán el comportamiento de sus vecinos, escogiendo puertos similares. Lo anterior se acompaña a su vez, con que la ubicación espacial de los expedidores se vincula con ciertas actividades económicas similares y por lo tanto las necesidades portuarias y navieras probablemente serán compartidas.

1.3 Antecedentes

Respecto al comportamiento en la elección portuaria, la mayoría de la literatura menciona aspectos como los costos de transporte hacia/desde el “hinterland” y la confiabilidad del recorrido total en un esquema de cadena de suministro más que de la elección por sí sola. Hay también estudios que muestran que en la práctica hay varios otros aspectos que determinan la elección portuaria. Otros estudios realzan la gran variabilidad por tipo de producto en esta elección (Malchow y Kanafani, 2001). Por otra parte, Tongzon (2009) señala que en muchos casos es el “freight forwarder” quien decide el puerto de recalada, en un complicado proceso de dos etapas.

En cuanto a los modelos de elección portuaria, existen estudios con diversas metodologías, tales como elección discreta, lógica difusa, entre otras. En los modelos de elección discreta, existe un gran número de enfoques de modelación basados en el modelo Logit Multinomial (por ejemplo, Nir et al., 2003; Magala y Sammons, 2008) pero que tienen problemas serios debido a correlación entre alternativas y/o heterocedasticidad de las alternativas de elección.

En efecto, el modelo logit supone como base fundamental que ninguna alternativa está correlacionada entre sí y, además, la varianza de los errores aleatorios del modelo es igual para todos ellos. Ninguna de esas dos características se cumple en el caso portuario, ya que los puertos presentan correlación entre sí ya sea por cercanía (correlación espacial) o por contratos de largo plazo con navieras o agentes exportadores (importadores), que generan correlación temporal en las decisiones; por otra parte, hay alta variación entre las alternativas portuarias lo que hace muy difícil la existencia de homocedasticidad en las varianzas de los términos de error de los modelos.

Hay pocos estudios publicados en revistas especializadas que utilicen un modelo de elección discreta que no requiera del cumplimiento de estas dos restricciones. Uno de ellos resuelve parcialmente el problema, a través de un modelo Logit Jerárquico, que si bien no puede trabajar correlaciones generales si puede considerar heterocedasticidad (ver Veldman et al., 2013). Tal vez el único modelo que incorpora explícitamente ambos elementos es el de Garrido y Leva (2004), quienes presentan un modelo Probit Multinomial que incorpora correlaciones, espaciales-temporales y una matriz de varianza-covarianza general para el conjunto de elecciones. Si bien ese modelo entrega buenos resultados y representa correctamente la interacción y decisiones de agentes, su uso es complicado por las dificultades matemáticas de calibración y estimación de probabilidades de elección, lo que

lo hace poco transferible a la práctica de no-expertos en modelación.

Existen otras metodologías más innovadoras, que proponen un modelo conceptual de elección de puertos basado en lógica difusa (Yeo et al, 2014). En este enfoque, diversas fuentes de datos se combinan para evaluar el desempeño de un puerto, determinado a través de la definición de una “puntuación difusa” definida usando grados de creencia, que se vinculan con el razonamiento probatorio para producir una puntuación de preferencia que permiten establecer criterios de elección de puerto. Sin embargo, esta metodología es altamente dependiente de la opinión de los “stakeholders” considerados, la que puede cambiar en el tiempo y en el espacio (en distintas regiones se le pueden otorgar distintos pesos a los atributos).

En cuanto a la aplicación de Autómatas Celulares (AC) como herramienta de modelación de elección portuaria, no se encontró bibliografía específica al caso estudiado. Sin embargo, tal como se muestra en Goles y Martínez (1998) este tipo de herramienta permite modelar fenómenos complejos y no lineales (como es la demanda por servicios portuarios) con gran eficiencia computacional y uso de información disponible.

Un AC es un modelo matemático del campo de la física computacional, propuesto inicialmente por John von Neumann en la década de 1950 para modelar y describir sistemas complejos como una colección masiva de objetos simples que interactúan localmente unos con otros. Son modelos muy adecuados para estudiar sistemas dinámicos que evolucionan en pasos discretos (ver por ejemplo Griffeath y Moore, 2003; Chopard y Droz, 2005).

1.4 Objetivos

Esta investigación tiene por objetivo desarrollar una nueva herramienta de modelación de captura de mercancías por parte de un nodo portuario que enfrenta competencia por parte de otros nodos dentro de una red de transporte marítimo-terrestre.

Para esto se propone utilizar una herramienta que ha demostrado ser de una enorme capacidad predictiva y descriptiva de fenómenos de distinta naturaleza: la teoría de autómatas celulares (AC). Principalmente, estas herramientas logran captar con facilidad interacciones espacio-temporales que en otros contextos de modelación son extremadamente difíciles de incorporar y calibrar (Garrido y Leva, 2004). Se postula aquí, que la elección portuaria es una decisión de múltiples actores que interactúan entre sí y que ponderan una multiplicidad de aspectos y comportamientos espaciales que configuran una elección dinámica que un AC puede imitar sin necesidad de conocer a todos los actores o a todos los determinantes de un proceso discreto que cambia en el tiempo.

2. DISEÑO DE AUTÓMATA CELULAR PARA ELECCIÓN PORTUARIA

2.1 Estructura y características del Autómata Celular Portuario (ACP)

Considérese un área correspondiente al “hinterland” de un sistema de m puertos. Se divide el área en un conjunto mutuamente excluyente y colectivamente exhaustivo de n zonas de generación de carga (ZGC). La Figura 1 muestra un esquema de las zonas y puertos que simula el ACP. Las zonas corresponden a las celdas del autómata celular portuario.

Cada ZGC actúa como un AC que puede tomar dos estados: activo/inactivo. Una ZGC está activa durante el período de tiempo t si utiliza uno de los puertos disponibles. La condición de actividad/inactividad en un cierto período, dependerá de la distancia de la zona al puerto, características propias del puerto (tarifas portuarias, disponibilidad de infraestructura, tiempos de servicio portuario, capacidad negociadora, especialización portuaria, existencia de contratos de servicio u otros) y el estado de las ZGC vecinas.

Se postula que la función que define la elección portuaria no sólo depende de los atributos antes señalados, sino que además incorpora un elemento estocástico que da cuenta (como en modelos de elección discreta) de al menos dos fenómenos: el modelador desconoce con certeza los atributos de cada puerto y una ZGC puede activarse/desactivarse por elementos exógenos a las variables incluidas en el modelo.

Así, la ZGC i -ésima tiene una función estado $e_i = j$, con j un entero entre 0 y m , donde m representa el número de puertos. Esta función toma el valor 0 cuando la zona está inactiva y j cuando la zona está activa por el puerto j .

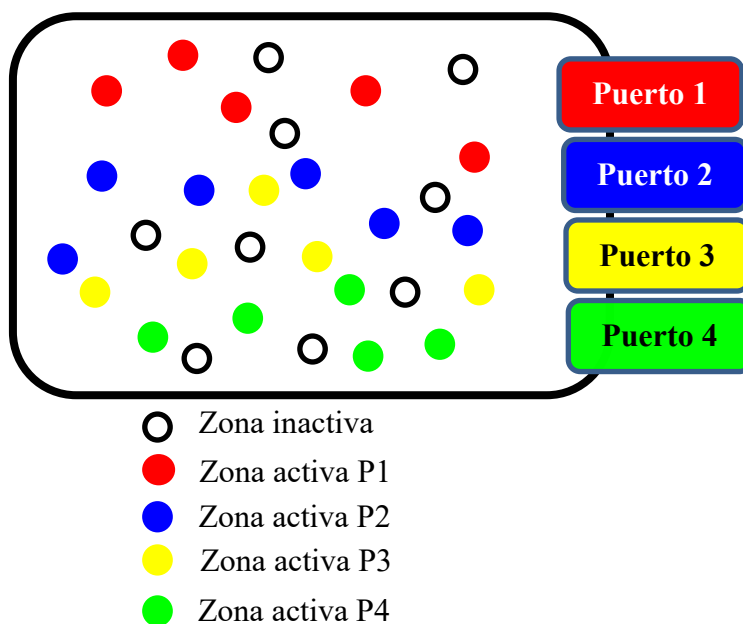


Figura 1. Esquema conceptual de las zonas y puertos en el ACP

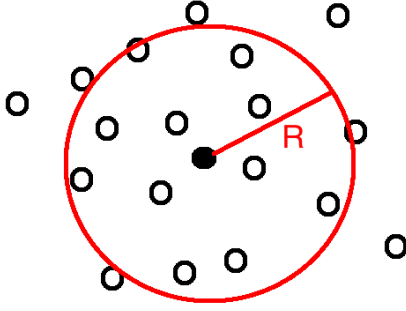


Figura 2. Esquema de la vecindad definida en el ACP

2.1.1 Vecindad en el ACP

La vecindad de una ZGC está dada por aquellas ZGC que estén dentro de un círculo de radio R (parámetro a calibrar) como se muestra en la Figura 2.

2.1.2 Función de Actualización

Una ZGC modifica su estado de acuerdo al siguiente criterio de actualización de un AC probabilístico:

1. Cada zona tiene asociado un número real z comprendido entre $0 \leq z \leq 1$, calibrado por el algoritmo genético. En cada paso del algoritmo, este número z , se reemplaza por otro número elegido de una distribución normal con media igual a z y desviación estándar σ .
2. Se evalúa la función $\Phi_1^i \in \mathfrak{R}^m$ sobre la región de vecindad de la ZGC i que se está actualizando. Esta función entrega un vector de m componentes. Cada uno de sus m componentes está formado por la proporción de ZGC dentro de su círculo de vecindad que escogen el puerto j (con $j=1,2,\dots,m$), respecto del total de ZGC activas de la vecindad, esto es:

$$\Phi_1^i = \left(\frac{n_1}{N_i}, \frac{n_2}{N_i}, \dots, \frac{n_m}{N_i} \right) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

en que n_1, n_2, \dots, n_m es el número de ZGC activas vecinas que escogieron el puerto 1 a m respectivamente en el período t y N_i es el total de ZGC activas vecinas dentro del círculo de vecindad de la ZGC i .

3. Se evalúa la función $\Phi_2^i \in \mathfrak{R}^m$. Esta función tiene como dominio las distancias a los m puertos, y las características propias de cada puerto (como tiempos de espera y tarifas). La expresión final de esta función, se presenta en la Ecuación 2.

$$\Phi_2^i = (\theta_d d_{i1} + \theta_c c_1, \theta_d d_{i2} + \theta_c c_2, \dots, \theta_d d_{ij} + \theta_c c_j) \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

donde θ_d y θ_c son coeficientes a calibrar (en este ejercicio todos toman el valor 1).

d_{ij} representa la distancia desde ZGC_i al puerto j (con $j=1,2,\dots,m$), y c_j representa los atributos del puerto j desde la perspectiva de los actores en la ZGC_i . En el caso de la variable c_j , no se contaba con información histórica para todos los puertos, por lo que fue calibrada como un coeficiente por el algoritmo genético.

4. A los componentes de la función Φ_2^i se les aplica un mapa que convierte su mayor componente en una probabilidad p , al segundo mayor en una probabilidad $p(1-p)$ y así sucesivamente decayendo como ley de potencia hasta $p(1-p)^{m-1}$. A esta nueva función le llamaremos Φ_2^i .
5. Finalmente se obtiene la función presentada en la Ecuación 3.

$$\Phi^i = \alpha\Phi_1^i + (1 - \alpha)\Phi_2^i \quad \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

con $\Phi^i \in \mathfrak{R}^m$. De acuerdo a esta especificación, α representa el peso que tiene en la elección portuaria la componente espacial asociada al estado de las ZGC vecinas y $(1-\alpha)$, el peso de la distancia y las características propias del puerto.

6. Si el número z de la zona es mayor que cierto umbral (T), el estado e_i de cada zona se actualiza y se le asigna el valor del puerto (un entero entre 0 y m) correspondiente a la componente más grande de la función Φ^i .

2.1.3 Parámetros del modelo

De acuerdo a la especificación anterior del modelo, los parámetros a calibrar son:

- El radio que define la vecindad (R).
- El número (α) que representa el peso a los vecinos.
- El umbral (T) para el número z de cada zona.

Adicionalmente el modelo requiere calibrar los siguientes parámetros auxiliares:

- El valor asociado a las características de cada puerto (c_1, c_2, \dots, c_m).
- La desviación estándar (σ), que define el ruido en el número z .
- La probabilidad (p) que se utiliza en el método de rango para elegir el puerto.
- El número (z_i) para cada ZGC_i en estudio.

2.2 Calibración del modelo

Los parámetros del modelo fueron calibrados utilizando un algoritmo genético, cuyo procedimiento es el siguiente:

- Se define una población inicial de 100 individuos. Cada uno de estos individuos representa una simulación completa para todo el horizonte de tiempo considerado. El genotipo de cada individuo son los valores de los parámetros del modelo (elegidos al

azar en la primera generación). El fenotipo asociado a cada individuo corresponde a los datos observables involucrados en la dinámica de la actividad portuaria (cantidad de zonas activas en el tiempo por un puerto determinado).

- Se define la siguiente función objetivo:

$$F_0 = \sum_{i,t} f_0(i, t) \quad (4)$$

$$f_0(i, t) = \left. \begin{array}{l} \gamma \text{ si } (e_i = er_i \neq 0) \\ 1 \text{ si } (e_i = er_i = 0) \\ 0 \text{ en otro caso} \end{array} \right\} \gamma \in \mathbb{R}^+ \quad \forall t \quad (5)$$

donde i representa una ZGC y t el período observado. En esta expresión e_i y er_i representan el estado de una ZGC en la simulación y en los datos reales respectivamente, en cada período observado. El valor de γ permite tener un grado de libertad para derivar a generaciones más adaptadas, privilegiando los aciertos activos (es decir, se privilegia un acierto en una zona activa que el acierto de una zona inactiva). Los 100 individuos se ordenan de acuerdo a la función objetivo. El primero es el individuo con el valor más grande de F_0 .

- Se definen operadores de cruce y mutación para obtener la nueva generación de individuos a partir de la generación pasada, manteniendo el mejor individuo.
- La calidad de cada individuo se evalúa junto con un descriptor de diversidad para mantener una población heterogénea en cada generación.
- Se define un criterio de convergencia que se relaciona con el porcentaje de aciertos en la dinámica del sistema. Este criterio consiste en expresar la función objetivo (Ecuación 4) en porcentaje y detener el algoritmo para un valor determinado (criterio de parada).

3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

3.1 Instancia de aplicación

Son muy pocos los países que disponen de un registro público de los orígenes y destinos de carga de comercio exterior al interior de su país. En el caso de Brasil, existe una base de datos pública que permite obtener la información antes señalada desagregada por tipo de carga, con un nivel de desagregación de hasta 6 dígitos del código arancelario.

Dentro de las cargas principales no graneleras que genera Brasil, se encuentra la exportación de vehículos. Esta carga requiere naves especializadas llamadas RoRo (roll on-roll of), las cuales en general, tienen una menor prioridad de atención en puertos que no poseen terminales de vehículos especializadas. Esto ha llevado a que marcas como Ford, construyan

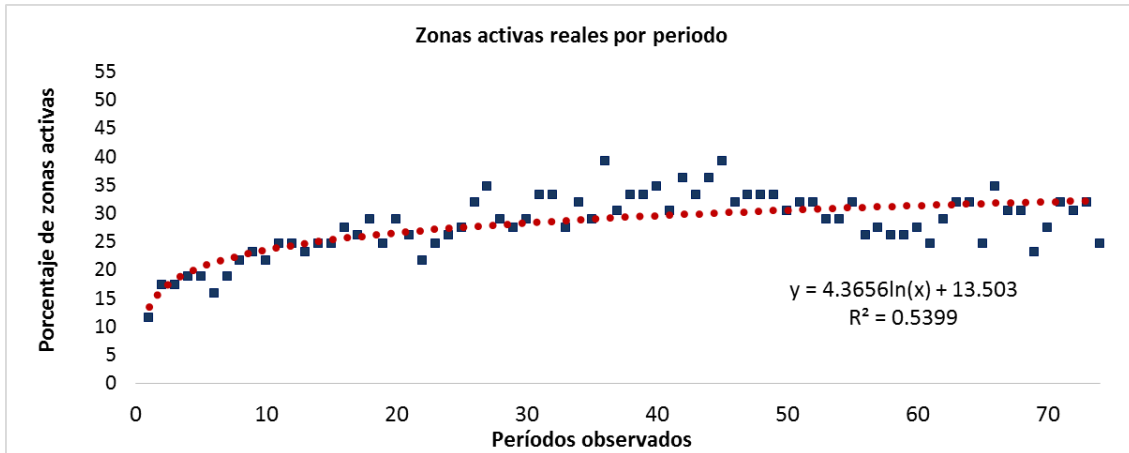


Figura 4. Porcentaje de ZGC activas en todos los períodos observados

Tabla 1. Parámetros obtenidos para el Autómata Celular Portuario

| Parámetro | Valor |
|-----------|-------|
| R (km) | 69 |
| α | 0.27 |
| T | 0.92 |

La Figura 4, muestra este porcentaje para cada período disponible, así como la curva logarítmica que se ajusta a los datos.

3.2 Resultados de la calibración

Los parámetros obtenidos del modelo, utilizando el algoritmo antes señalado, se presentan en la Tabla 1.

Estos resultados se obtuvieron considerando un porcentaje de aciertos de 70% y un γ igual a 4. Los valores indican que la elección de puerto de una ZGC se ve influida en un 27% por la elección de las ZGC ubicadas dentro de un radio de 69 km de dicha zona. El resto de la elección estaría influida por la distancia y características del puerto.

El alto valor obtenido para el parámetro T , correspondiente al umbral, se explica por la baja proporción de zonas activas que se observa en cada período. Esta condición implica una mayor dificultad de activación de una ZGC en el tiempo, la cual se gatilla sólo si se supera el umbral T . Esta característica es fácilmente descrita por un autómata celular, pero no así por un modelo de elección discreta o de regresión, ya que éstos tienden a presentar mayores errores para elecciones poco presentes en la muestra de calibración.

3.3 Comportamiento del modelo como herramienta predictiva

Para evaluar el comportamiento del modelo se realizaron corridas de prueba sin alterar los parámetros asociados a cada puerto. Así, el cambio en la actividad de las zonas y su asignación a cada puerto se explica principalmente por la componente $\alpha\Phi_I$ de la función Φ

(efecto de la actividad de la vecindad de cada zona) y por la aleatoriedad representada por z respecto al umbral calibrado.

El modelo fue ejecutado 20 veces durante 80 períodos (cada período representa un trimestre, por lo que el periodo de predicción equivale a 20 años), con el fin de observar su comportamiento en el largo plazo.

Al comparar el porcentaje promedio de aciertos de cada período (línea azul de la Figura 5) con los datos reales de los 74 períodos disponibles (Figura 4), se observa que existe en ambos casos, una tendencia similar en el tiempo. En cuanto al rango sobre el cual se mueve el total de zonas activas, éste se extiende entre 12% y 40% en el promedio del caso simulado y entre 12% y 39% en los datos reales, siendo por tanto de órdenes de magnitud muy similares. Lo anterior indica que el modelo logra representar adecuadamente la dinámica del proceso estudiado.

Un tipo de análisis que se puede realizar con este modelo tiene relación con las variaciones en las participaciones de mercado, frente a cambios en las características propias de cada puerto. A modo de ejemplo, se estudió el comportamiento que tendría el mercado, frente a dos puertos cercanos, y en los cuales uno de ellos logra ser un 20% más atractivo que su principal competencia. En el caso del modelo, esto significa una variación en la componente c_j de la Ecuación 2.

En la Figura 6 se muestra la participación de mercado en la situación base simulada. Como se puede observar el Puerto 1, no tiene participación de mercado, a pesar de estar espacialmente muy cercano al Puerto 3. Esto se debe a que el Puerto 1 no cuenta con condiciones atractivas para el mercado (infraestructura, accesibilidad, equipos, tarifas, etc.).

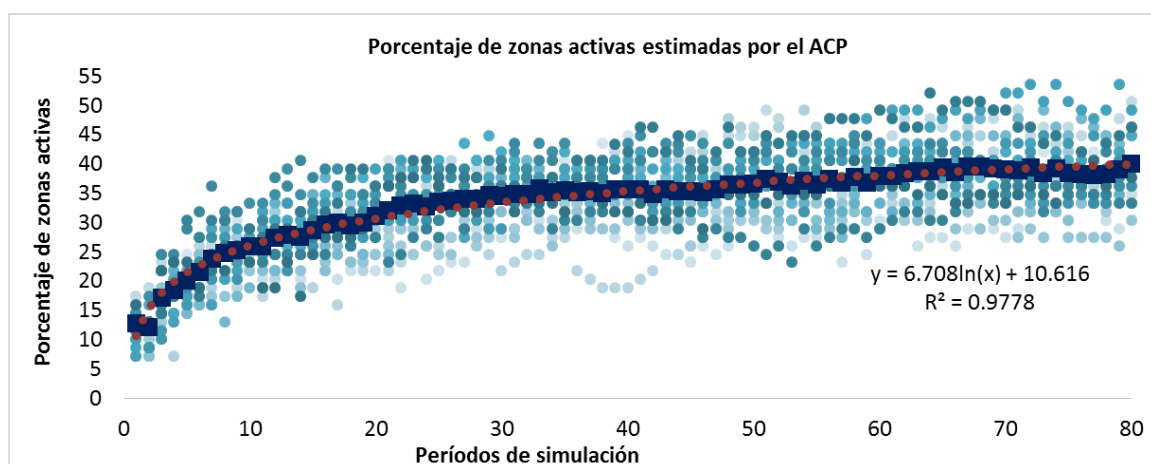


Figura 5. Predicción a 20 años de porcentaje de zonas activas

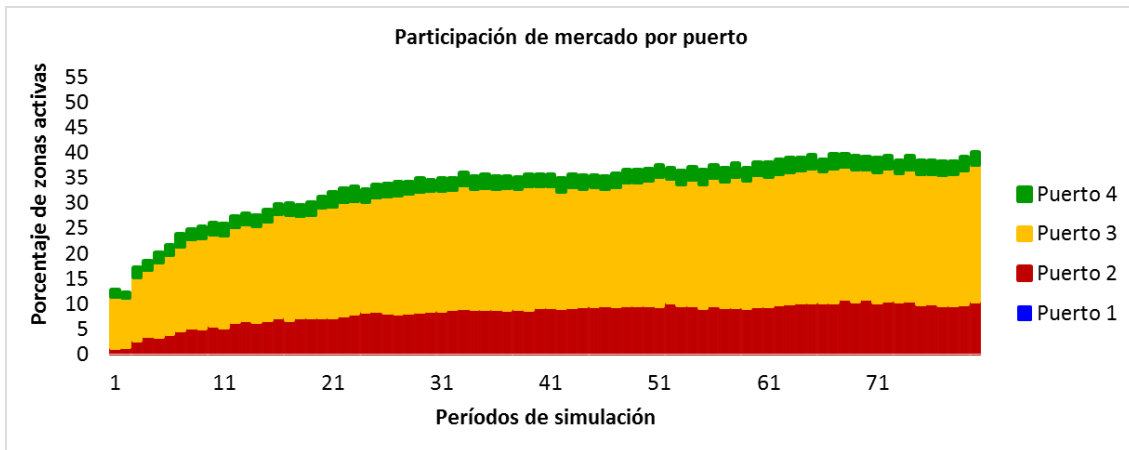


Figura 6. Predicción a 20 años de participación de mercado por puerto

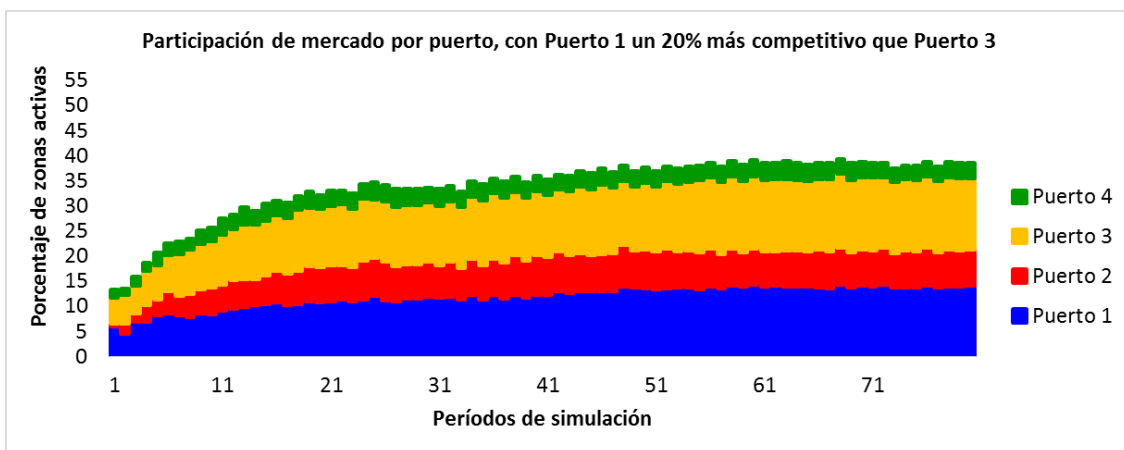


Figura 7. Predicción a 20 años de participación de mercado por puerto, considerando al Puerto 1 un 20% más competitivo que el Puerto 3

Sin embargo, si asumimos que este puerto logra ser un 20% más competitivo que su principal competencia (Puerto 3), su participación promedio en el horizonte de tiempo simulado aumentaría a 12%, tal como se muestra en la Figura 7.

Con este mismo ejemplo de aplicación es posible estimar una elasticidad promedio (estable en largo plazo) de la participación de mercado del Puerto 3, respecto a variaciones en la competitividad del Puerto 1. De acuerdo con los resultados obtenidos, la variación de un punto porcentual en la competitividad del Puerto 1, implicaría una variación de la participación de mercado del Puerto 3, en 2.3 puntos. Esta alta elasticidad se debe a dos componentes. Por una parte, la competitividad misma del puerto y por otra, el efecto espacial de su elección por parte de los vecinos de las zonas ubicadas en el “hinterland” de ambos puertos.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un modelo de asignación portuaria basado en un autómata celular

probabilístico, que busca imitar la decisión de múltiples actores que interactúan entre sí y que ponderan una multiplicidad de aspectos y comportamientos espaciales que configuran una elección dinámica.

La especificación del autómata celular diseñado fue aplicada a un caso práctico de exportación de automóviles en Brasil y se calibró utilizando un algoritmo genético.

Los resultados indicaron que la elección de puerto de una ZGC, se ve influida en un 27% por la elección de las ZGC ubicadas dentro de un radio de 69 km de dicha zona. El resto de la elección estaría influida por la distancia y características propias de cada puerto.

Para analizar la capacidad predictiva del modelo, éste fue ejecutado 20 veces durante 80 períodos (equivalente a 20 años). Los resultados mostraron una tendencia equivalente a la presentada por los datos observados, al igual que los rangos de porcentaje de zonas activas, indicando que el modelo logró representar adecuadamente la dinámica del proceso estudiado.

Uno de los usos prácticos de este modelo es la determinación de la elasticidad de la participación de mercado de cada puerto frente a variaciones en las características de éstos. Así por ejemplo, se estimó que para el caso de dos puertos cercanos, como son Santos y Sao Sebastiao en Brasil, si este último lograra un punto porcentual de competitividad más sobre Santos, lograría captar 2.3 puntos de la participación del mercado de exportación de vehículos.

AGRADECIMIENTOS

Mabel Leva agradece al Grupo de Investigación de Sistemas de Transporte de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Cantabria, España, por su apoyo y colaboración. Alejandro León y Rodrigo Garrido agradecen el apoyo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Diego Portales de Chile.

REFERENCIAS

- CHOPARD, B. Y DROZ, M. (2005). *Cellular Automata Modeling of Physical Systems*. Cambridge University Press, Cambridge.
- GARRIDO, R.A. Y LEVA, M. (2004). *Port of destination and carrier selection for fruit exports: a multi-dimensional space-time multinomial probit model*. *Transportation Research Part B* 38 (7), pp. 657-667.
- GOLES, E. Y MARTINEZ, S. (1998). *Cellular Automata and Complex Systems*. Nonlinear Phenomena and Complex Systems Series, Kluwer Academic.
- GRIFFEATH, D. Y MOORE, C. (2003). *New Constructions in Cellular Automata*. Oxford University Press, Oxford.

- MAGALA, M. Y SAMMONS, A. (2008). *A New Approach to Port Choice Modelling*. Maritime Economics & Logistics 10, pp. 9–34.
- MALCHOW, M. Y KANAFANI, A. (2001). *A disaggregate analysis of factors influencing port selection*. Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research 28 (3).
- NIR, A. S., LIN, K. Y LIANG, G. S. (2003). *Port choice behaviour--from the perspective of the shipper*. Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research 30 (2).
- TONGZON, J. (2009). *Port choice and freight forwarders*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 45 (1), pp. 186–195.
- VELDMAN, S., GARCIA-ALONSO, L. Y VALLEJO, J. (2013). *A port choice model with logit models: A case study for the Spanish container trade*. International Journal of Shipping and Transport Logistics 5(41398), pp. 373-389.
- YEO, G-T, NG, A.K.Y., LEE, P. T-W Y YANG, Z. (2014). *Modelling port choice in an uncertain environment*. Maritime Policy & Management 41(3), pp. 251-267.

SECCIÓN 6

LOGÍSTICA HUMANITARIA

HUMANITARIAN LOGISTICS

34 Modelagem e simulação dos processos de aquisição e transporte em desastres

Fabiana Santos Lima

Ricardo Villarroel Dávalos

Mirian Buss Gonçalves

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso de um desastre natural causado por inundações sob a ótica da logística e com foco em atividades de logística humanitária. A abordagem proposta utiliza a simulação a eventos discretos de cenários de inundação ocorrido no Sul do Brasil, usando atividades logísticas de aquisição e transporte para a modelagem do processo de entrega dos itens de assistência de uma organização humanitária. A principal contribuição está no auxílio da tomada de decisão referente a tarefa que influencia os tempos de entregas dos itens de assistência humanitária a partir dos cenários com e sem tempos de atraso nas entregas causadas pelos desastres naturais.

Palavras chave: Modelagem, Processos, Simulação, Desastres

1. INTRODUÇÃO

Logística Humanitária (LH) é composta por um conjunto de atividades que inclui: preparação, planejamento, aquisição, armazenamento, transporte, seja de bens ou informações, desde o ponto de origem até o ponto de consumo, com o objetivo de aliviar o sofrimento de pessoas vulneráveis. Serve como uma ponte entre a preparação e resposta a desastres por meio do estabelecimento de procedimentos eficazes de compras, relacionamento com fornecedores, estoques preposicionados e conhecimento das condições de transporte locais (Thomas, 2004). E, além disso, a velocidade de resposta para grandes programas humanitários que envolvem saúde, comida, abrigo, água e intervenções de saneamento são dependentes da capacidade de logística para adquirir, transportar e receber o material no local de ajuda humanitária (Falasca e Zobel, 2011).

A tomada de decisão referente a eventos emergenciais pode apresentar uma série de desafios que precisam ser tratados conforme sua especificidade, a qual pode vir representada segundo métodos de investigação, procedimentos de análise, sistema de informação, bem como, uma rotina de desempenho de processos e estudo de caso (Ferreira, 2010). A modelagem, análise e documentação dos processos de LH podem obter apoio em modelos de referência, como por exemplo, o Modelo de Referência de Tarefas (Reference Task Model - MRT) proposto por Blecken (2009). Este modelo é aplicável genericamente para tarefas de emergência e

pós-emergência de gestão da cadeia de suprimentos das organizações humanitárias. A análise e melhoria dos processos geralmente são realizadas a partir de cenários e apoiadas pela simulação orientada por eventos discretos e/ou por processos. Um dos aspectos a ser considerado nestes cenários é a complexidade de estabelecer uma estratégia global para uma situação de desastre em função da disparidade de ideias individuais e da falta de coordenação dos processos entre os agentes que compõem a LH.

Trabalhos relacionados à gestão de processos de emergências têm sido apresentados para as operações humanitárias e de gestão de resposta a desastres (Blecken, 2010; Widera e Hellingsgrath, 2011). Para Tomasini e Van Wassenhouve (2009), é importante ter sistemas e processos nos locais que possam facilitar a colaboração entre os atores para manter altos níveis de eficiência no momento da resposta. Estes modelos apresentam vários benefícios, como por exemplo, colaboração e cooperação bem como a melhoria do desempenho (otimização) de processos. Diante deste contexto, este estudo tem como principal objetivo simular um cenário de inundação no Estado de Santa Catarina – Brasil usando as atividades de aquisição e transporte para a modelagem do processo de entrega de itens de assistência de uma organização humanitária. As principais contribuições encontram-se associadas à minimização do tempo de resposta e apoio à tomada de decisões às situações emergenciais.

A simulação de cenários para organizar e avaliar as atividades de aquisição e transporte foi desenvolvida com o objetivo de reduzir o tempo de resposta nas operações humanitárias.

O desenvolvimento de um modelo de simulação compõe-se de três etapas: formulação do modelo, implementação do modelo e análise dos resultados (Chwif e Medina, 2010).

Este artigo considera a conceituação de LH, o estudo de um desastre, a modelagem e simulação, a partir da ferramenta Arena, de forma a auxiliar a compreensão e avaliação dos processos da organização humanitária no processo de entrega dos itens de assistência humanitária. O principal resultado deste estudo é a melhoria dos processos de coordenação de desastres, e pode servir de base para órgãos como a Secretaria de Defesa Civil do estado de Santa Catarina – Brasil (Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina é a organização humanitária governamental responsável pelas ações de defesa civil do estado de Santa Catarina) e instituições envolvidas na coordenação de processos logísticos em situações emergenciais. A simulação do modelo dos processos de LH proposto representa uma abordagem quantitativa, e tem a finalidade de atender no tempo mais próximo da data a demanda emergencial, utilizando para isto o fornecedor com capacidade suficiente para atender na data solicitada ou o mais próximo possível a esta data (Lima et al., 2014; Lima 2014). Assim as localizações dos fornecedores, bem como o tempo de entrega, são variáveis importantes a serem analisadas. Quanto menor o tempo para atender totalmente a demanda, melhor o desempenho do sistema.

2. MODELAGEM EM LH

Poucas e importantes contribuições referentes a modelagem de processos em LH podem ser encontradas na literatura. Assim, por exemplo, Tufinkgi (2006) descreve um “modelo de processos logísticos em caso de catástrofe internacional”; McGuire (2006) desenvolveu um quadro para gestão da cadeia de suprimentos de produtos de saúde fornecidos como assistência humanitária em emergências complexas; e Blecken (2009) sugere o Modelo de Referência de Tarefas (MRT). Na construção deste modelo, Blecken (2009) elaborou um quadro (Figura 1) para orientar os usuários do MRT à navegação no modelo e entre as suas várias camadas.

O modelo distingue cerca de cento e vinte tarefas na cadeia de abastecimento humanitário ao longo de dois eixos: a decomposição hierárquica do horizonte de planejamento de tarefas estratégicas, táticas e operacionais, e uma divisão no eixo funcional referente à avaliação, aquisição, armazenagem, transporte, geração de relatórios e operações de suporte. As decisões sobre a estrutura da cadeia de suprimentos são feitas no nível estratégico, em que o horizonte de tempo pode ir além de dois anos. No nível tático, que abrange um horizonte de tempo de seis meses a dois anos, toda a cadeia de abastecimento é planejada e otimizada. Uma utilização otimizada dos recursos que são alocados no nível tático, é o principal objetivo no nível operacional. Cada tarefa neste nível se estende até seis meses.

A aplicação do modelo de referência inclui a especialização de tarefas em um caso de uso específico, incluindo a instanciação de responsabilidade e prestação de contas, bem como a definição de fluxos de informação. Para isto Blecken (2009) utilizou uma matriz de responsabilidades (MR), a qual conecta as atividades ou tarefas às pessoas ou recursos a fim de verificar atribuição de funções e responsabilidades das tarefas para os agentes da cadeia de abastecimento humanitário. O MRT foi desenvolvido com a participação de mais de 30 organizações humanitárias, o que reflete as atividades do mundo real em gestão da cadeia de suprimentos humanitária. Utilizou-se este modelo do Blecken (2009) e expandiu-se o alcance das atividades aquisição e transporte. Os processos do MRT serviram como um framework para auxiliar na modelagem das tarefas envolvidas no processo de entrega dos itens de assistência humanitária. A Figura 2 ilustra o processo proposto para a entrega dos itens de assistência humanitária na notação BPMN, e considera a existência de algum tipo de comunicação entre a organização responsável no atendimento aos desastres (defesa civil local ou regional) e os fornecedores considerados parceiros.

Os fornecedores foram definidos na atividade “Executar Fluxo de Redes”, em que se define o melhor conjunto de fornecedores respeitando o tempo, a demanda e a capacidade de entrega no lugar atingido (ver Lima, 2014). Sendo assim, a partir da localização destes fornecedores, escolhe-se como deverá ser feita a entrega dos produtos solicitados considerando o menor tempo.

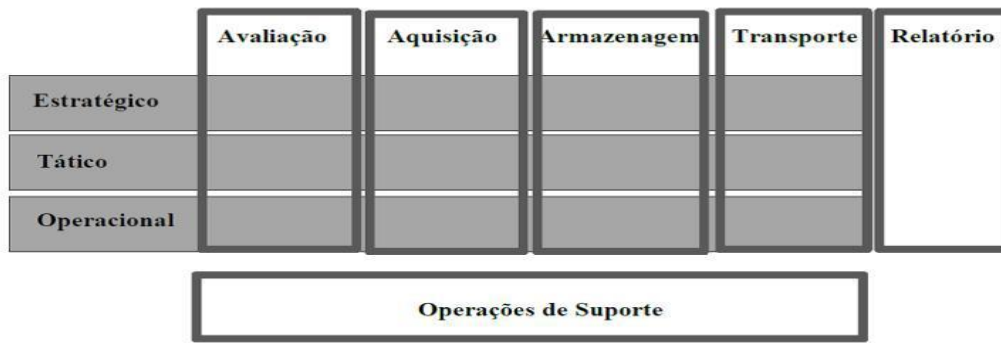


Figura 1. Framework do MRT

Fonte: Adaptado de Blecken, 2009

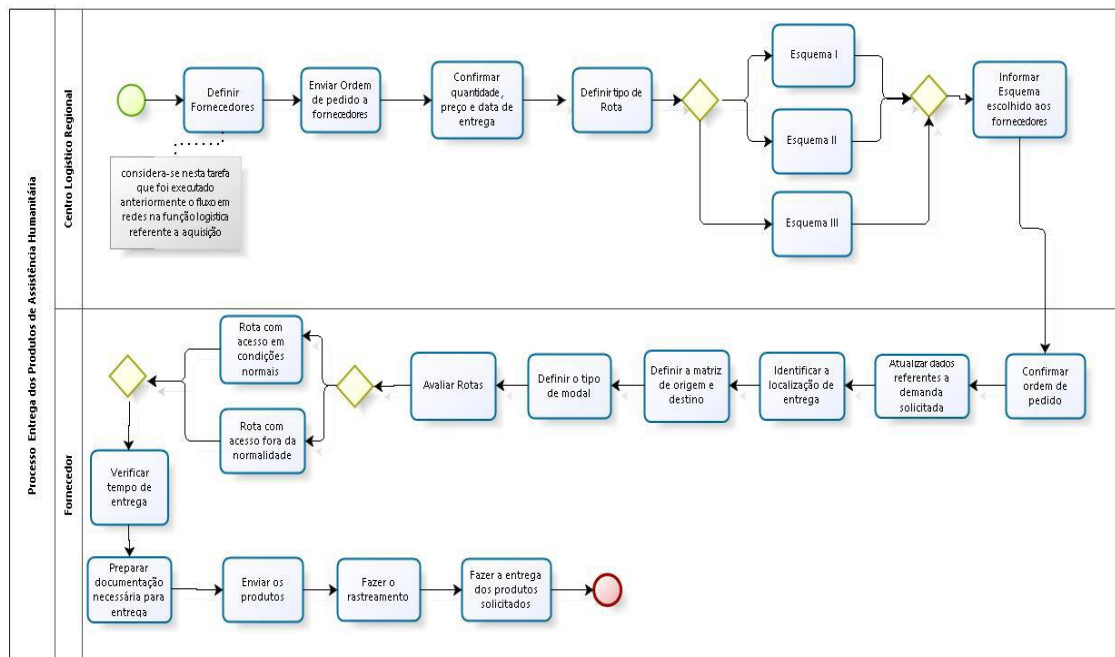


Figura 2. Processo de entrega dos Itens de Assistência Humanitária

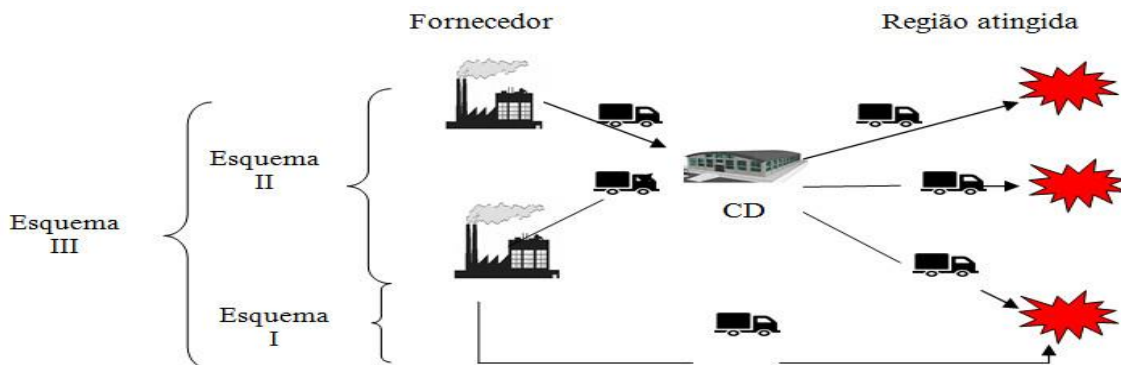


Figura 3. Esquemas de distribuição a partir do fornecedor até a região atingida por desastres

De forma geral a entrega pode ser feita de três formas: (I) a partir do fornecedor de cada produto até o município que representa a região atingida; (II) a partir do fornecedor de cada produto até o centro de distribuição (CD) e do CD até a região atingida; e (III) dependendo da urgência e da gravidade da região atingida. Os dois esquemas anteriores podem ser utilizados ao mesmo tempo, ou seja, enquanto o CD entrega os produtos emergenciais em estoque para as regiões atingidas, os fornecedores escolhidos são acionados e já encaminham os produtos diretamente à região atingida. A Figura 3 representa estes esquemas.

Na modelagem apresentada, a tarefa referente a “Verificar tempo de entrega” pode ser auxiliada por uma análise de cenários para situações em que se considera que a rota não foi atingida pelo desastre (situações dentro da normalidade) e, para situações em que de alguma forma esta rota foi atingida, como por exemplo, a queda de uma ponte, alagamentos ou ainda a queda de uma árvore, entre outras situações que não permitem o acesso (situações fora da normalidade).

3. SIMULAÇÃO NA LOGÍSTICA HUMANITÁRIA

A maioria das publicações na área de logística humanitária são estudos de casos e revisões conceituais, e os autores destacam a falta de estudos empíricos ou analíticos que pudessem realmente fazer uma grande diferença para o desafio de logística humanitária. A maioria desses estudos têm utilizado técnicas de pesquisa operacional, incidindo sobre problemas de localização de facilidades, como por exemplo problema de máxima cobertura local ou problemas de planejamento de transporte de roteamento/veículo otimizando o fluxo de material de socorro através de redes de distribuição existentes (Wilberg e Olafsen, 2012).

Besiou et al. (2011) apresentam a metodologia System Dynamics (SD) como uma ferramenta para ajudar os tomadores de decisões humanitárias. O modelo conceitual é desenvolvido para um programa de simulação, o qual é executado em cenários hipotéticos. Os autores estudam e simulam o Sistema de Gestão de Frota de Veículos (Field Vehicle Fleet Management – Field-VFM) em Organizações Humanitárias Internacionais (International Humanitarian Organizations, IHO).

Vallejo et al. (2015) propõem um modelo de programação matemática bi-level para a logística humanitária para otimizar as decisões relativas à distribuição da ajuda internacional depois de um desastre catastrófico. Utilizaram dados reais do terremoto do Chile em 2010 e simularam um cenário de distribuição de ajuda.

Massei et al. (2014) propõem um simulador para ser compartilhado e utilizado entre Forças Armadas e agências civis para abordar a gestão de crises, missões humanitárias, reconstrução e desenvolvimento do país, considerando operações conjuntas (ou seja, a cooperação militar e civil). A abordagem proposta garante a interoperabilidade entre diferentes simuladores dentro de uma federação HLA (High Level Architecture), a fim de recriar cenários de crise

combinando simulação detalhada de múltiplos fatores.

Ertem e Buyurgan (2013) abordam problemas referentes a ineficiência na aquisição de bens necessários para operações em logística de ajuda; esses problemas ocorrem principalmente devido à falta de coordenação entre os fornecedores e organizações parceiras. Formulações de programação inteira são usadas em operações de venda em leilão. É utilizado um modelo de simulação que gera problemas para avaliar e ajustar os parâmetros de design de nível do sistema. O modelo é codificado utilizando linguagem Java.

Ben-Tal et al. (2011) propõem uma metodologia para atenuar a incerteza da demanda nas cadeias de fornecimento de ajuda humanitária. Aplicaram otimização robusta (Robust Optimization – RO) para atribuir dinamicamente problemas de resposta de emergência e problemas de fluxo de tráfego na evacuação com tempo incerto de demanda. Experimentos de simulação mostraram que a solução fornece excelentes resultados quando comparada à solução determinística e à solução estocástica.

Wilberg e Olafsen (2012) analisaram se o desempenho de resposta humanitária pode ser aumentado com a utilização de grandes embarcações comerciais para pré-estocar e transportar itens de ajuda humanitária. Desenvolveram um modelo de simulação a fim de testar várias configurações de um sistema de resposta humanitária alternativa. Os resultados gerados pelo modelo foram comparados com os dados de resposta de desastres anteriores, a fim de determinar se o sistema alternativo é capaz de entregar os itens alívio mais rápido e a um custo menor do que o sistema atual. Segundo as pesquisas desenvolvidas pelos autores, um maior número de pessoas pode receber assistência e uma redução na parcela gasta em logística poderá liberar recursos financeiros, os quais podem ser usados para melhorar os processos e as capacidades internas que suportam um desenvolvimento sustentável a longo prazo das organizações humanitárias.

Mohan et al., (2011) focaram em questões de planejamento operacional da cadeia de abastecimento na distribuição de alimentos, a fim de melhorar a eficiência do centro de recuperação. Desenvolveram um modelo de simulação discreto para imitar as operações do centro de recuperação. Utilizaram software de simulação Arena. Analisaram os seguintes parâmetros: chegada dos alimentos, tempos de processo de descarregamento, digitalização, controle de qualidade e montagem e armazenamento, layout e distâncias de transporte dentro do armazém.

A criação de modelos quantitativos pode possibilitar um maior entendimento das consequências de uma mudança sem arriscar o ambiente real a eventos de tentativa e erro. Devemos considerar que nenhum modelo é a representação completa da realidade, mas sim, devemos considerar que os modelos podem representar partes da realidade que é conduzida segundo uma previsão dos pesquisadores do modelo. Um modelo de simulação pode ser utilizado quando for difícil apreender a dinâmica de um sistema de equações aplicáveis em

uma técnica ideal para um sistema grande e complexo que precisa ser avaliado (Harmonsky, 2008).

Em modelos de otimização busca-se encontrar uma solução ótima para determinada situação, já, modelos de simulação tem significados heurísticos. O modelo de simulação apresenta saídas para diferentes cenários, e o pesquisador pode comparar os diversos resultados sem necessariamente encontrar a solução ideal. O estudo do melhor cenário pode ser desenvolvido utilizando análise de sensibilidade, com o intuito de testar se o cenário selecionado pode ou não apresentar melhores resultados e em que circunstancias um cenário apresenta melhor desempenho. Segundo alguns autores (Manuj et al., 2009; Bottani e Montanari, 2010; Law e McComas, 2001), a simulação é uma das ferramentas mais utilizadas para observar o comportamento das cadeias de abastecimento ou para analisar o quanto eficaz e eficiente pode ser um sistema logístico.

Várias são as formas e as maneiras que uma simulação pode ser definida. Estas definições apreendem o enfoque de prever o comportamento ou o desempenho de um sistema específico ao longo do tempo, enquanto as variáveis de entrada estão sendo modificadas.

Sistemas de preparação para os desastres devem estar configurados com a realidade; devido à incerteza de como, onde e quando um desastre poderá ocorrer, as variáveis de entrada, para qualquer modelo de simulação, estão fadadas a fortes mudanças, e, sendo assim, diferentes cenários podem e devem ser adaptados a cada realidade estudada. Nesta realidade em que, devido ao alto grau de incerteza, pode ser difícil obter observações do mundo real, a simulação é então utilizada como uma técnica de modelagem sem perturbar o sistema real.

A quantidade de publicações referentes a logística humanitária e simulação (considera-se artigos, capítulo de livro, livro, anais de conferencias) está tendo um incremento representativo desde 2007. A Figura 4 ilustra este crescimento. Enquanto no ano de 2005 o número de publicações estava abaixo de 1000 publicações, no ano de 2013 o número chegou a ser maior que 2000 publicações. Este crescimento pode ser um indicativo quanto ao interesse de pesquisa na área.

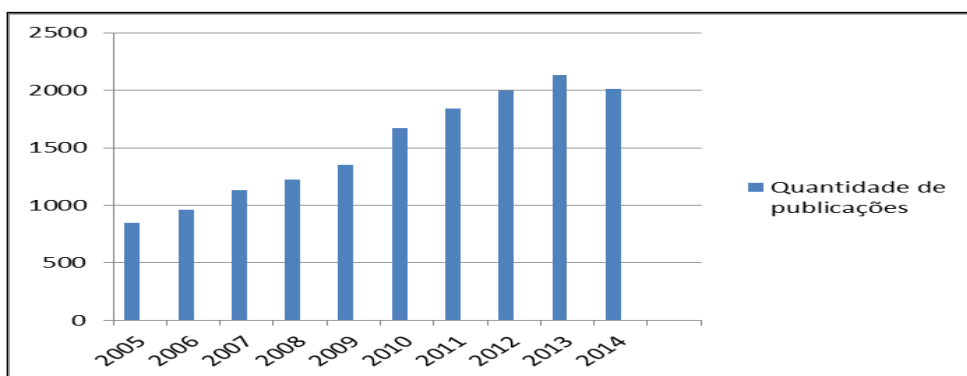


Figura 4. Quantidade de publicações

4. CENÁRIO DO DESASTRE

Santa Catarina é um dos estados do Brasil, localizado na região sul do país, com 295 municípios e 6.248.436 habitantes. Sua capital e sede do governo é a cidade de Florianópolis, localizada na Ilha de Santa Catarina (IBGE, 2015). O estado é coberto por várias bacias hidrográficas e muitos de seus municípios foram fundados às margens dos rios. É um dos estados brasileiros que apresenta um conjunto mais forte de elevações e depressões do terreno. O estado de Santa Catarina é cenário de alagamentos, enchentes, inundações bruscas e graduais, escorregamentos, estiagens, vendavais, tornados, nevoeiros e ressacas. Segundo o anuário brasileiro de desastres naturais (2012), o sistema climático na região está associado a eventos adversos e condições de estabilidade.

Em setembro de 2013, conforme relatório divulgado pela Defesa Civil de Santa Catarina, 92 cidades tiveram prejuízos com as chuvas no estado: os rios se elevaram mais de 10 metros, causando inundações em várias regiões do estado. Um total de 31.147 pessoas sofreu com as cheias. Operações de resposta emergenciais ocorreram aproximadamente durante 14 dias (22/09/2013 até o dia 04/10/2013), e vários municípios decretaram situação de emergência. A Mesorregião do Vale do Itajaí, que é formada pela união de 54 municípios agrupados em quatro Microrregiões (Blumenau, Itajaí, Ituporanga e Rio do Sul), foi a mais atingida.

“A situação mais crítica ainda é no município de Rio do Sul, com 6 mil pessoas desalojadas e 1.080 moradores desabrigados, e que no momento estão espalhados pelos 20 abrigos colocados à disposição pela Prefeitura Municipal. Em Agronômica, Laurentino, Rio do Oeste ainda há pessoas desalojadas ou desabrigadas: 510 em Agronômica, 380 desalojados e 256 desabrigados e 528 pessoas desalojadas e 220 desabrigadas em Rio do Oeste.” Jornal G1/SC (2013).

A Figura 5 exibe a localização das 92 cidades atingidas pelas chuvas no estado de Santa Catarina durante este evento. Considerando a representatividade deste evento para o estado, foi desenvolvido o cenário criado a partir deste evento. Devido ao elevado número de municípios atingidos no estado, buscou-se elaborar a pesquisa àqueles municípios que representam a Mesorregião do Vale do Itajaí, por ter sido, segundo dados da Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina, a região mais atingida. A diretoria de resposta ao desastre da Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina está dividida em três gerências (Defesa Civil, 2015):

- Gerência de Operações e Assistência: responsável por avaliar as demandas oriundas das cidades afetadas e organizar todas as ações que envolvem as operações de resposta aos desastres, especialmente no controle de sinistros, socorro às vítimas do desastre e assistência à população afetada.
- Gerência de Logística e Mobilização: tem a atribuição de adquirir e encaminhar os itens definidos pela Gerência de Operações e Assistência às áreas afetadas, definindo todo o

processo de aquisição, assim como o modal de transporte dos produtos e serviços especiais.

- Gerência de Reabilitação e Restabelecimento: atua no auxílio da reabilitação dos cenários atingidos, analisando toda a necessidade de reestruturação dos serviços essenciais e restabelecimento emergencial das estruturas e obras de arte comprometidas. Assim como a orientação para confecção de planos de trabalho emergenciais e o tratamento/destinação do resíduo sólido oriundo de desastre.

Segundo a gerência de logística e mobilização, os itens de assistência humanitária mais solicitados neste evento foram: cesta básica, kit limpeza, colchão e água.

Sendo assim, avaliaram-se as demandas destes produtos, por dia, para o atendimento emergencial nos municípios atingidos na Mesorregião do Vale do Itajaí.

Municípios que compõem a mesorregião do Vale do Itajaí são agrupados em Microrregiões (IBGE,2015); considerou-se para a aplicação deste estudo a Microrregião de Blumenau, devido a sua representatividade referente à quantidade demandada e devido a sua localização. Os municípios desta Microrregião de Blumenau foram agrupados; utilizou-se para isto a matriz de distancias mínimas e definiu-se a alocação dos municípios. Cada grupo de municípios foi representado por um município sede. A Tabela 1 ilustra esta divisão.

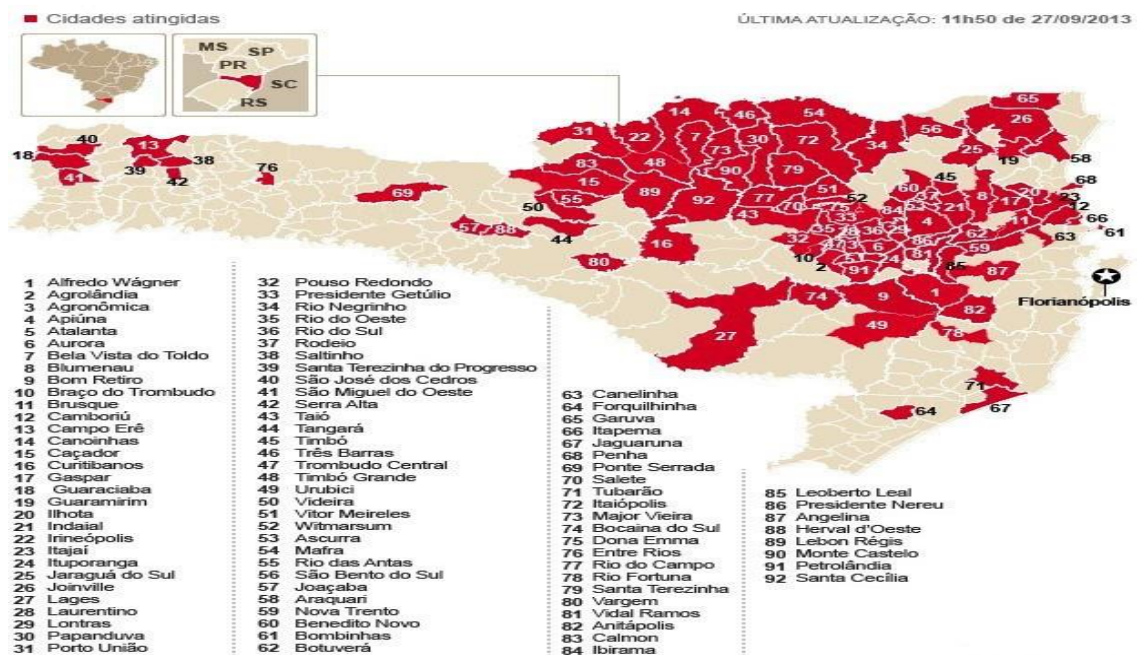


Figura 5. Localização das cidades atingidas pela chuva no estado de Santa Catarina

Fonte: Jornal G1/SC, 2013

Tabela 1. Municípios selecionados

| Microrregião de Blumenau | |
|---------------------------------|---|
| Município Sede | Municípios selecionados |
| Lontras | Aurora Rio do Sul Agronômica Lontras |
| Dona Emma | Rio do Oeste Taio Dona Emma |
| Laurentino | Rio do Campo Laurentino Vitor Meirelles |

Esta abordagem considera que, no nível operacional, a organização local responsável ao atendimento emergencial solicita a atualização dos dados de cada fornecedor, analisa a oferta e verifica os dados de entrada dos fornecedores parceiros. Identifica quais fornecedores locais estão ativos e estão enquadrados nos critérios de qualidade solicitada.

No cenário em estudo, fornecedores da região de Blumenau foram acionados para atender a demanda solicitada. A entrega dos itens de assistência humanitária foi então simulada para este cenário; buscou-se identificar qual o tempo de entrega do fornecedor até as regiões atingidas considerando a situação dentro da normalidade e a situação fora da normalidade.

5. MODELO DE SIMULAÇÃO

A fim de testar as opções referentes ao tempo de entrega dos Itens de Assistência Humanitária, desenvolveu-se um modelo de simulação para eventos discretos para imitar as operações de entrega a partir do fornecedor, atendendo ao processo conforme apresentado na Figura 2. O modelo foi desenvolvido utilizando software de simulação Arena.

Especificamente para o desastre de inundação, ocorrido no estado de Santa Catarina no ano 2013, foi feita uma coleta de dados e análise junto a gerencia de logística e mobilização da Secretaria de Defesa Civil de Santa Catarina sobre os seguintes parâmetros de entrada:

- *Demanda*: analisou-se a quantidade solicitada de cada produto por dia que cobriam o total dos 14 dias de operação nos municípios atingidos. Esta análise ajudou a verificar que a concentração maior de solicitação estava na primeira semana e, assim, calculou-se a demanda média por produto em cada município da microrregião para este período de 7 dias.
- *Distância*: verificou-se a distância entre os fornecedores de cada produto e os municípios sede da microrregião. Calculou-se o tempo de deslocamento de cada fornecedor até o município sede. Ressalta-se que os fornecedores utilizados estavam

localizados no município de Blumenau. Consideraram-se duas situações, primeiro o tempo percorrido para a situação dentro da normalidade, e, segundo, o tempo percorrido para situação fora da normalidade. Neste caso, estimou-se um acréscimo máximo de 6 horas para cada viagem, o que se deve a queda de uma ponte.

- *Tempo de solicitação dos pedidos*: analisou-se os documentos referentes a solicitação dos pedidos do coordenador local de cada município atingido para o gerente de logística e mobilização, e verificou-se que, desde a entrega do documento ao gerente para a análise e avaliação até o despacho do pedido, o processo demorou em torno de 8 a 12 horas. Esta análise ajuda a determinar os padrões de fluxo do pedido, o que influencia no tempo de entrega.
- *Custo*: verificou-se o preço atribuído por cada fornecedor para cada produto. E definiu-se como custo o preço médio por produto.

Uma vez que os dados foram obtidos, encaixaram-se as funções estatísticas para caracterizar a variabilidade dos parâmetros. A Figura 6 apresenta um exemplo do modelo de simulação desenvolvido. Este modelo foi replicado para os grupos de municípios alocados conforme Tabela 1: grupos com município sede no município de Lontras (R1), grupos com município sede no município de Dona Emma (R2) e grupos com município sede no município de Laurentino (R3).

A simulação foi desenvolvida para a situação de normalidade e para a situação fora da normalidade considerando que os itens de assistência humanitária serão entregues a partir do fornecedor até a região atingida, conforme Esquema I apresentado na Figura 3, por ser este o esquema utilizado pela Defesa Civil no estado em estudo.

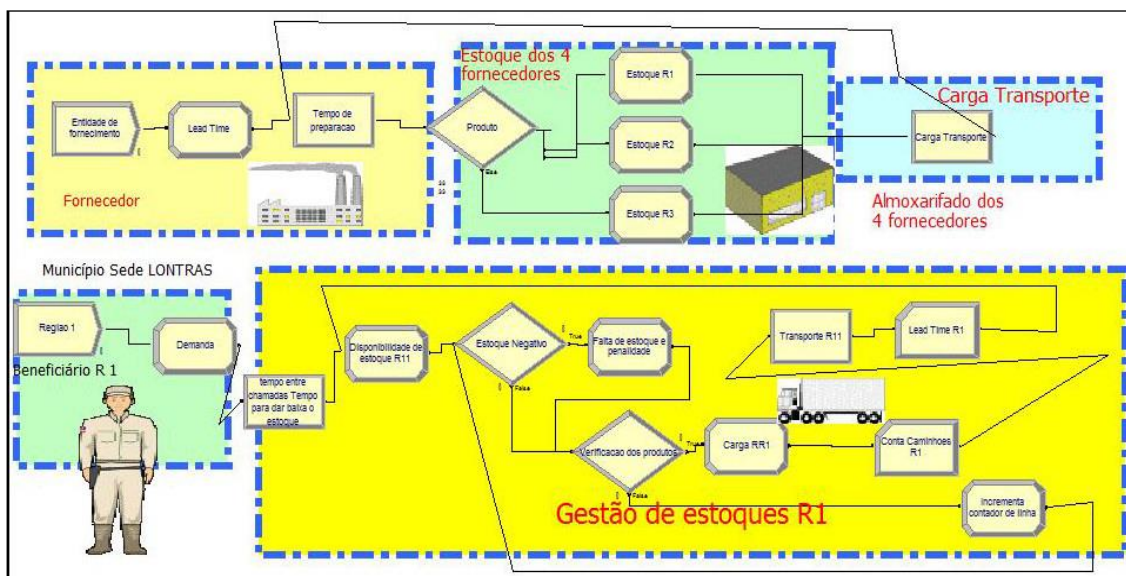


Figura 6. Exemplo do modelo de simulação utilizado

5.1 Resultados

Foram feitas 10 replicações do modelo considerando um alto nível de estoque do fornecedor, visto ser considerado como fornecedor candidato somente aquele com capacidade de entrega para o período solicitado. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

Os custos definidos para cada região na Tabela 2 representam os custos dos 4 itens (Cesta Básica, Kit Limpeza, Colchão e Galão de 5 litros de água). Por exemplo, o custo de 632.852 u.m. é o custo da demanda total atendida na Região 1.

As Tabelas 3 e 4 apresentam os custos e as demandas atendidas por item e por região na situação de normalidade e na situação fora da normalidade, respectivamente.

5.2 Análise

Na situação de normalidade, os itens de assistência humanitária foram entregues num tempo menor que 2 dias, atendendo assim a demanda solicitada da semana no prazo solicitado (lead time em torno de 1 dia). Observa-se que a primeira região (R1) apresenta o número maior de viagens: ocorreram 72 viagens para a entrega dos itens de assistência no prazo pré-determinado e o maior custo das três regiões.

Para situação fora da normalidade, a demanda solicitada não foi cumprida, ou seja, somente alguns itens de assistência humanitária foram entregues. Apesar dos municípios estarem relativamente próximos, a escolha de mudança da rota, ou ainda a espera por socorro, fez um acréscimo de 6 horas para as viagens, o que impossibilitou a entrega dos itens de assistência. Apenas 7 viagens foram possíveis de serem realizadas para a primeira e segunda regiões (R1 e R2), ou seja, mesmo o fornecedor, tendo capacidade para atender, visto que a falta de estoque é zero, não foi possível fazer a entrega de toda a demanda solicitada na semana. Somente aqueles itens entregues com tempo médio de entrega de aproximadamente 32 horas foram concretizados nas três regiões.

Tabela 2. Resultados totais

| | Situação de normalidade | | | Situação fora da normalidade | | |
|-------------------------|-------------------------|----------|----------|------------------------------|----------|----------|
| | R1 | R2 | R3 | R1 | R2 | R3 |
| Lead Time | 23h24min | 23h10min | 24h48min | 31h44min | 33h32min | 31h15min |
| Custos (u.m.) | 632,852 | 772,138 | 430,745 | 128,530 | 341,766 | 185,666 |
| Viagens | 72 | 61 | 58 | 7 | 7 | 6 |
| Falta de estoque | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Nível de serviço | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |

Tabela 3. Custos e demanda atendida por item e por região na situação de normalidade

| Itens | Situação de Normalidade | | | | | |
|-------|-------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| | Região 1 | | Região 2 | | Região 3 | |
| | Custo (u.m.) | Dem. atendida (unid.) | Custo (u.m.) | Dem. atendida (unid.) | Custo (u.m.) | Dem. atendida (unid.) |
| 1 | 465,675.32 | 3881 | 492,847.14 | 4107 | 373,509.42 | 3113 |
| 2 | 89,510.78 | 2557 | 33,714.98 | 963 | 45,197.97 | 1291 |
| 3 | 75,682.29 | 841 | 225,185.82 | 2502 | 9,834.37 | 109 |
| 4 | 1,984.2 | 567 | 20,390.81 | 5826 | 2,204.7 | 630 |

Tabela 4. Custos e demanda atendida por item e por região na situação fora da normalidade

| Itens | Situação Fora da Normalidade | | | | | |
|-------|------------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------|--------------|-----------------------|
| | Região 1 | | Região 2 | | Região 3 | |
| | Custo (u.m.) | Dem. atendida (unid.) | Custo (u.m.) | Dem. atendida (unid.) | Custo (u.m.) | Dem. atendida (unid.) |
| 1 | 168,160.53 | 1401 | 218,145.45 | 1818 | 160,995.44 | 1342 |
| 2 | 32,323.24 | 924 | 14,923.02 | 426 | 19,481.84 | 557 |
| 3 | 27,329.72 | 304 | 99,672.41 | 1107 | 4,238.95 | 47 |
| 4 | 716.52 | 205 | 9,025.44 | 2579 | 950.07 | 271 |

6. CONCLUSÃO

O desafio de logística humanitária é a de “fazer chegar a ajuda certa para as pessoas certas, na hora certa”. Para isto, um inventário correto das necessidades o transporte de mercadorias e um sistema de entrega que é tão eficiente quanto às circunstâncias permitem que ele seja um dos elementos chave para atingir este desafio (Boin e Hart, 2010).

De forma geral, as classificações dos desastres influenciam diretamente na resolução deste desafio. Segundo Holguín-Veras et al. (2012), as catástrofes são definidas como eventos de alta consequência que geram impactos generalizados e debilitantes, onde a capacidade da sociedade impactada a responder é severamente comprometida. Tecnicamente, um evento catastrófico é aquele em que a maior parte ou a totalidade da infraestrutura na comunidade é muito atingida. As autoridades locais são incapazes de realizar o seu papel habitual de trabalho, a ajuda de comunidades vizinhas não pode ser fornecida, a maioria, se não todas, as funções do cotidiano da comunidade são bruscamente e simultaneamente interrompidas (Quarantelli, 2006; Wachtendorf et al., 2013).

Um desastre não catastrófico é aquele em que a população, as autoridades locais e as

organizações humanitárias podem lidar com as consequências. Apesar de significativas, há pouca destruição da infraestrutura. A resposta envolve menos entidades convergentes, existe interface entre os setores público e privado, e permite maior autonomia e liberdade de ação (Quarantelli, 2006). Em caso de uma catástrofe, a maioria das fontes (produtos, bens) têm que ser trazidas de fora da área impactada, enquanto que em um cenário não-catastrófico alguns recursos permanecem (por exemplo, caminhões, estruturas de liderança, estoques em empresas) que poderiam se tornar a primeira onda de ajuda aos necessitados (Wachtendorf et al., 2013). Apesar do elevado número de pessoas e regiões atingidas, o Brasil ainda apresenta um cenário não catastrófico. Como o país lida com o evento, depende muito do governo, da sociedade, e da vulnerabilidade da população. Diante deste contexto, um cenário de inundação no Estado de Santa Catarina – Brasil foi simulado usando as atividades de aquisição e transporte conforme Blecken (2010) para a modelagem do processo de entrega de itens de assistência de uma organização humanitária (Figura 2).

O modelo de simulação recriado a partir de dados apresentados pela organização humanitária, em que os itens de assistência são entregues a partir do fornecedor diretamente para a região atingida (Esquema I) mostrou que quando alguma intervenção ocorre na rota escolhida, de forma a causar um atraso, o fornecedor não consegue atender totalmente a demanda de entrega dos itens de assistência humanitária para o prazo exigido de no máximo 48 horas, considerando-se que a frequência de pedidos ocorre de 8 a 12 horas para os 7 dias. Desta forma, o escolher o Esquema III seria melhor, onde a cadeia de abastecimento é baseada estrategicamente em uma estrutura pré-posicionada de CDs e então, no momento emergencial, a distribuição é feita a partir dos CDs dentro da sua região geográfica, assim como os fornecedores também fazem a entrega diretamente para a região atingida. Este modelo descentralizado vem de encontro com o aplicado pela (International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies – IFRC, 2012) e de acordo com Wilberg e Olafsen (2012, pag.12):

“Mesmo que a cadeia de fornecimento descentralizado melhore a eficiência e a eficácia das operações da FICV, eles ainda são confrontados com o mesmo desafio como qualquer outra organização humanitária; é impossível estimar a demanda exata de itens de ajuda humanitária e a localização geográfica do próximo desastre. Assim, toda vez que ocorre um desastre, as organizações humanitárias devem configurar uma cadeia de fornecimento temporário a fim de auxiliar a área afetada.”

Na busca de minimizar o tempo de resposta, neste trabalho a simulação auxiliou a modelagem do processo de entrega dos itens de assistência humanitária (Figura 2) na tomada de decisão referente a escolha do melhor esquema (I, II ou III). Assim, dependendo do tipo de desastre e da intensidade deste desastre na região atingida, a organização humanitária pode identificar aquele que melhor se adequa para a área afetada.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa de pós-graduação em engenharia da produção da UFSC e ao apoio financeiro da Capes.

REFERENCIAS

- BEN-TAL, A., CHUNG, B., MANDALA, S.R. e YAO, T. (2011). *Robust optimization for emergency logistics planning: Risk mitigation in humanitarian relief supply chains*. Transportation Research Part B 45. 1177–1189. Doi: 10.1016/j.trb.2010.09.002.
- BESIOU, M., STAPLETON, O. e WASSENHOVE L.V., (2011). *System dynamics for humanitarian operations*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management Vol. 1 No. 1, pp. 78-103 Emerald Group Publishing Limited 2042-6747. Doi: 10.1108/20426741111122420.
- BLECKEN, A. (2009). *A Reference Task Model for Supply Chain Processes of Humanitarian Organizations*. Doctorate Thesis. Institute of the University of Paderborn.
- BLECKEN, A. (2010). *Supply chain process modelling for humanitarian organizations*. Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 40(8/9), pp. 675-692.
- BOIN, A. e HART, P. (2010). *Organising for Effective Emergency Management: Lessons from Research*. The Australian Journal of Public Administration, vol. 69, no. 4, pp. 357–371. Doi: 10.1111/j.1467-8500.2010. 00694.x
- BOTTANI, E. e MONTANARI, R. (2010). *Supply chain design and cost analysis through simulation*. International Journal of Production Research 48 (10): 2859-2886.
- CHWIF, L. e MEDINA, A.C. (2010). *Modelagem e Simulação de eventos discretos*. Teoria e Aplicações. 3.ed. São Paulo: Ed. do Autor, 2010.
- DEFESA CIVIL (2015). *Secretaria do Estado de Defesa Civil*. Acesso em 15.01.2014. <http://www.defesacivil.sc.gov.br/index.php/institucional/resposta/gerencia-de-logistica-e-mobilizacao.html>
- ERTEM, M.A. e BUYURGAN, N. (2013). *A Procurement Auctions-Based Framework for Coordinating Platforms in Humanitarian Logistics*. Humanitarian and Relief Logistics Operations Research/Computer Science Interfaces Series, Springer (54):111-127.
- FALASCA, M. e ZOBEL, C.W. (2011). *A two-stage procurement model for humanitarian relief supply chains*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management 1(2):151 – 169.
- FERREIRA, F. (2010). *Dynamic Response Recovery Tool for Emergency Response within State Highway Organisations in New Zealand*. Thesis Doctor of Philosophy at the University of Canterbury.
- HARMONSKY, (2008). *Simulation*. Chapter 12 in Operations Research and Management Science Handbook, edited by A. Ravi Ravindran, Boca Raton, Fla.: Taylor & Francis.
- HOLGUÍN VERAS, J., JALLER, M., WASSENHOVE, L.V., PEREZ, N. e WACHTENDORF, T. (2012). *On the unique features of post-disaster humanitarian logistics*. Journal of Operations Management. 3 (7-8): 494-506.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE (2015). Acesso em 14.02.2014. <http://www.ibge.gov.br/>
- INTERNATIONAL FEDERATION OF RED CROSS AND RED CRESCENT SOCIETIES, IFRC (2012). Acesso em 12.01.2015. <http://www.ifrc.org/en/what-we-do/logistics/>
- JORNAL G1/SC (2013). Acesso em 15.01.2014. <http://g1.globo.com/sc/santa-catarina/noticia/2013/09/>
- LAW, A.M. e MCCOMAS, M.G. (2001). *How to build valid and credible simulation model*. Proceedings of the 2001 Winter Simulation Conference, 22-29. Accessed 03.07.2012.
- LIMA, F. S. (2014). *Logística Humanitária: modelagem de processos para a fase de aquisição na resposta a desastres naturais*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil. 2014.
- LIMA, F.S., OLIVEIRA, D. e GONÇALVES, M.B. (2014). *Methodology for Clustering Cities Affected by Natural Disasters*. Advances in Intelligent Systems and Computing. New Perspectives in Information Systems and Technologies. Springer. Pp 97-107 Vol. 1,2014.
- MANUJ, L., MENTZER, J.T. e BOWERS, M.R. (2009). *Improving the rigor of discrete-event simulation in logistics and supply chain research*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management 39 (3): 172-201.
- MASSEI, M., POGGI, S., AGRESTA, M. e FERRANDO, A. (2014). *Development planning based on interoperable agent driven simulation*. Journal of Computational Science 5: 395–407.
- MCGUIRE, G.A. (2006). *A development of a supply chain management framework for health care goods provided as humanitarian assistance in complex political emergencies*. PhD Thesis, Wirtschaftsuniversität Wien, Vienna.
- MOHAN, S., GOPALAKRISHNAN, M. e MIZZI, P.J. (2013). *Improving the efficiency of a non-profit supply chain for the food insecure*. Int. J. Production Economics. 143, 248–255. Doi: 10.1016/j.ijpe.2011.05.019.
- QUARANTELLI, E.L. (2006). *Catastrophes are different from disasters: implications for crisis planning and managing drawn from Katrina; understanding Katrina: perspectives from the social sciences*. <http://understandingkatrina.ssrc.org/Quarantelli> accessed 15 November 2010.
- THOMAS, A. (2004). *Elevating Humanitarian Logistics*. International Aid & Trade Review.
- TOMASINI, R. e WASSENHOUE, L.V. (2009). *Humanitarian logistics*. Insead Business Press. 2009.
- TUFINKGI, P. (2006). *Logistik im kontext internationaler katastrophenhilfe: Entwicklung eines logistischen referenzmodells für katastrophenfälle*. Ed. Haupt Verlag. Bern, Stuttgart, Wien.
- VALLEJO, J.F.C., RODRÍGUEZ, E.G., ALMAGUER, F.J. e RAMÍREZ, R.G.G. (2015). *A bi-level optimization model for aid distribution after the occurrence of a disaster*. Journal of Cleaner Production 105,134 e 145.
- WACHTENDORF, T.; BROWN, B; HOLGUIN-VERAS, J. (2013). *Catastrophe characteristics and their impact on critical supply chains: problematizing material*

convergence and management following Hurricane Katrina. Journal of Homeland Security and Emergency Management Volume 10, Issue 2, Pages 497–520, ISSN (Online) 1547-7355, ISSN (Print) 2194-6361, DOI: 10.1515, September 2013.

WIDERA, A. e HELLINGRATH, B. (2011). *Improving Humanitarian Logistics - Towards a Tool-based Process Modeling Approach*. In: Proceedings of the Logistik management. Bamberg, 273-295.

WILBERG, K.H.; OLAFSEN, A.L. (2012). *Improving humanitarian response through an innovative pre-positioning concept: an investigation of how commercial vessels can be used to store and transport relief items*. BI Norwegian Business School, MSc Thesis, 134p. Noruega.

35 A methodology to develop a multi-criteria framework for a reliable aid distribution

Fabiola Regis

Jaime Mora Vargas

Tecnológico de Monterrey, México.

Ángel Ruiz

Université Laval, Quebec, Canada.

ABSTRACT

In recent years, disasters have increased their occurrence and intensity, leaving devastated population, which need water, food and medical equipment, among others. When a disaster strikes, local and international help is required, making necessary the interventions from governmental agencies, NGOs, private sector companies and militaries. Coordination among stakeholders, due their different perspectives and goals, is one of the main opportunity areas in humanitarian logistics. In order to deliver the humanitarian aid, the distribution must be done under a high uncertainty demand and infrastructure damage, where previously considered routes may or not be available after the disaster strikes. In literature, several multi-objective studies can be found, but there is very little said on how to balance the relative importance and how they can be translated from qualitative goals into quantitative ones to be considered in optimization models. According to literature the impact of the coordination between stakeholders and the network availability are two of the trade-offs for the humanitarian logistics decision making process. Based on previous statement, a multi-criteria framework for a reliable aid distribution optimization model is proposed in this paper. The methodology for the multi-criteria framework development proposed in this paper is centered on a vertical coordination, where the availability of the network, equity, efficiency, coverage and efficacy are prioritized in order to balance and ensure a reliable aid distribution.

Keywords: Humanitarian logistics, reliability, multi-criteria, vertical coordination.

1. INTRODUCTION

In recent years, disasters have increased their occurrence and severity (EM-DATA, 2015), and forecasts estimated that over the next 50 years disasters will increase by five times their hazard levels and risk. According to Ortuño et al., (2013), humanitarian logistics is:

“the process in charge of planning, implementing and controlling the efficient, cost-effective flow and storage of goods and materials as well as related information, from

the point of origin to the point of consumption for the purpose of meeting the end beneficiary's requirements and alleviate the suffering of vulnerable people”.

According to Altay & Green (2006), disasters are divided in four lifecycle stages, where mitigation and preparedness stages occur before the disaster, in order to minimize the probability of the disaster or its possible effects. In these phases, the protocols are reinforced and people is trained to be prepared for a new disaster. Response and recovery are better known as post-disaster stages and try to minimize the effects of the disaster by helping people as quick as possible supporting the community in order to reestablish their normal state respectively (Altay & Green, 2006).

The response stage is characterized because of the demand uncertainty and urgency, leading the necessary intervention of local and international organizations. Due this, several stakeholders having different perspectives, goals, interests, capacities and expertise, must work together to achieve the common humanitarian logistics' goal, causing *coordination* among involved stakeholders become a key aspect. The lack of coordination results in duplicate efforts and resources used in an inadequately manner, leading to a slow and obstructed relief efforts (Moshtari & Goncalves, 2011), have attracted the interest from researchers in the last decade.

1.1 Problem statement

In literature *coordination* has been defined as “*the management of parallel actions in ways that increase the effectiveness*” (Ergun, et al., 2010), and in humanitarian supply chain refers to “*the relationships and interactions among different actors operating within the relief environment*” (Sumeet et al., 2015). Coordination is represented in horizontal and vertical dimensions, where *horizontal coordination* is the one among competitors providing similar services, or internal department with similar functions, and *vertical coordination* refers to the parallel actions with suppliers, customers, or across departments of the same organization in upstream or downstream activities (Akhtar, et al., 2012; Moshtari & Goncalves, 2011).

Although humanitarian logistics decision making process is already a challenge because the uncertainty of demand, resources scarcity, funds competition, costs coordination and the infrastructure damage, the quantity and diversity of actors increase the complexity of the process (Balcik et al., 2010).

The overall humanitarian supply chain coordination is important, and must be implemented through all the relief supply chain activities, which encompasses three main groups, where:

- *Procurement*: refers to the identification of the sources and resources requested for the detected needs of affected people.
- *Warehousing*: makes possible the resources protection and a well-organized system until they are delivered to their final destination.
- *Transportation*: the available supplies are taken to the site where they are needed

considering the real possibilities and the alternatives for timely and safe delivery of the assistance. Transportation is one of the most reviewed activities in logistics, and is justified due the 60% costs of any supply chain impact (Leiras, et al., 2014).

To diminish the suffer of affected population, demand operations performed for relief supply chain must be efficient (Anbuudayasankar, et al., 2012; Van Wassenhove, 2006). It is important to notice that all activities are linked, and the poor functioning of any of them implies an unsatisfactory performance of the other activities. Difficulties in mitigation and preparedness stages are expected, but in response stage, uncertainties in demand, supply, environmental conditions and roads, complicate humanitarian operations (Anbuudayasankar, et al., 2012).

In humanitarian relief distribution, the aid delivery must be done from different international locations, also known as primary hubs, to secondary hubs for a post-delivery to a Local Distribution Center (LDC), to finally be distributed to the affected population. The last part of the humanitarian supply chain (from LDC to demand points) is referred to as Last Mile Distribution (LMD) (Balcik, et al., 2008). This last part of the humanitarian supply chain is one of the most critical due the several transportation modes must be used, uncertainty and variability of the routes and infrastructure damages.

In order to attend the distribution problem, several optimization models have been proposed, where each of them tackled problems for different transportation stages and from different perspectives, resulting in several multi-objective contributions. The pursue of more than one goal and the intervention of many actors, leads the need to use multi-criteria decision methods, to ensure the balance and the right impact of the goals that humanitarian supply chain want to achieve. Also, in recent years the increased interest on develop metrics to evaluate the humanitarian supply chain performance, is observed. A challenge to apply these metrics in the decisions making process, and specifically encompasses these metrics with the stakeholders' preferences, allowing to translate them into a quantify model that provides support to make quick and efficient solutions.

Justified by the literature review, and in order to tackle the coordination challenge in humanitarian logistics' decision process, a multi-criteria framework development methodology is proposed in this paper. The balance and prioritization of the stakeholders' preferences are obtained through an extensive literature review. For this research work purpose, a LMD scenario is considered.

This paper is structured as follows. In Section 2, a further review about coordination and performance criteria in the Last Mile Distribution are presented. The proposed multi-criteria framework methodology is shown in Section 3. Finally, the results and conclusions are provided in Section 4 and 5, respectively.

2. RESEARCH METHODOLOGY

In order to give the reader the context of this research work, this section presents the literature review about the contributions in coordination and performance criteria in the LMD problem. The first subject is the optimization models proposed for Last Mile Distribution problem, in order to identify the most used objectives. The second subject shows a review about coordination of the involved stakeholders in relief distribution, which pretend to state the conceptual and applied research works already developed. Finally, the Performance Measurements in Humanitarian Supply Chain review, will helped to identify the performance metrics to evaluate the humanitarian supply chain.

2.1 Literature review

2.1.1 Optimization models

Several optimization models have been proposed in the relief transportation LMD research area. Some of the most relevant contributions in last years are the following. Balcik, et al., (2008) presented a modeling approach of mixed integer programming model to optimize the resource allocation and routing decision for the transportation cost minimization and the maximization of the aid delivery. Vitoriano et al., (2009) proposed a Decision Support System for the building of routes and the supply and demand commodities and vehicles, pursuing the costs minimization, probability minimization and reliability maximization, as objectives. A super network model that represents coordination and interaction among multiple stakeholders, focused on minimizing costs, was presented by Huang et al., (2011). In Naji-Azimi et al., (2012), the location of the Satellite Distribution Centers (SDCs) used for the relief distribution in Last Mile stage is modeled. The equity concept is considered by Anaya-Arenas et al., (2013) and they proposed three different approaches to seek a fair distribution of relief. Also a location-allocation and distribution problems are tackled to support a Decision System (Rekik, et al., 2013). Battini, et al., (2014) presented an analytical model, extension of Balcik, et al., (2008), which considers the distribution problem relating on the variation of outputs, no-shortage constraint, and cost in function of the fleet characteristics. Liberatore et al., (2014) proposed and solved the problem of planning for recovery of damaged elements of the distribution network, in order to benefit the consequent relief distribution as much as possible. Finally, a multi-objective model that considers relief supply and network restoration, which provides an equity-based solution for constrained capacity, budget and resource problems is provided (Ransikarbum & Mason, 2016).

The literature review shows that the most frequently used objective functions are: costs minimization (26%), unmet demand minimization (19%), response time minimization (15%), travel time minimization (11%), and equity of satisfied demand maximization 7%) (Figure 1).

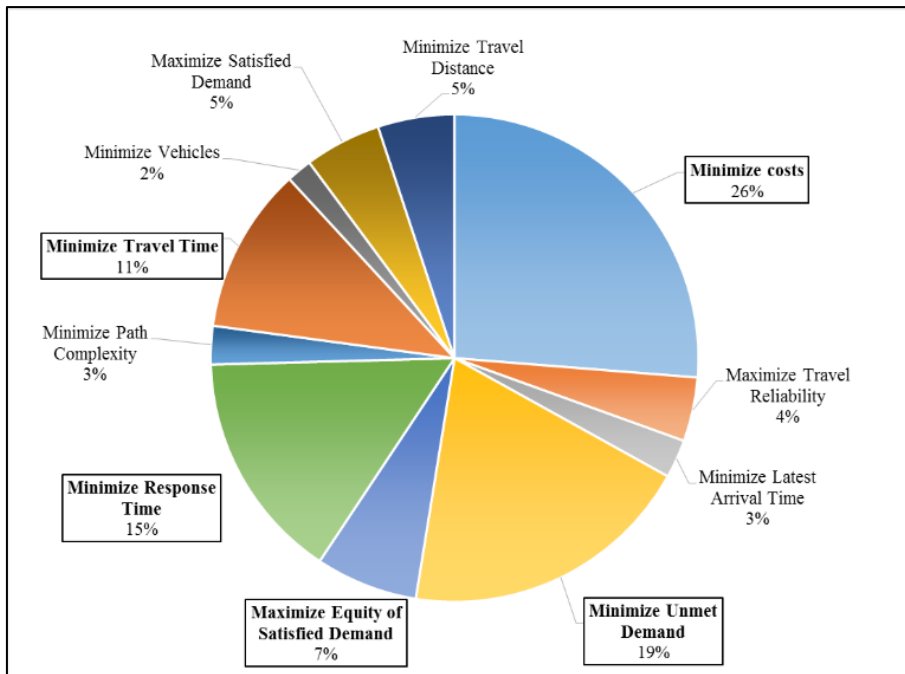


Figure 1. Objective functions in Last Mile Distribution stage

2.1.2 Coordination

Balcik et al., (2010) reviewed the challenges in coordinating humanitarian aid distribution and described the current and emerging coordination practices in disaster relief. Moshtari and Goncalves (2011) shown the behavior of the horizontal coordination among humanitarian organizations during the stages of humanitarian operations, identifying their drivers and barriers. Huang et al., (2012) proposed a conceptual mathematical model, which minimizes the overall coordination costs, in order to evaluate the cost-effectiveness of coordination mechanism. Dolinskaya et al., (2011) identified critical components and challenges related to coordination and recommended strategies to overcome the found obstacles. Hovhanessian (2012) presented an analysis of the vertical coordination barriers between humanitarian organizations and commercial agencies in relief distribution, Akhtar et al., (2012) provided specific and detailed information from the selected humanitarian relief chains of the South Asian earthquake 2005. Heaslip (2012) contributed with an empirical comparison of military and humanitarian organizations and proposed a framework which identifies the interactions between stakeholders and involved components. Finally, Kabra et al., (2015) pursued two main objectives, the first one was to explore the coordination barriers in Humanitarian Supply Chain Management relevant to the Indian context, and the second was to prioritize the identified barriers on the basis of their severity and to derive key managerial insight.

The coordination literature review concluded that, researchers consider important to develop frameworks about coordination between actors involved in humanitarian logistics. Even in last years, many authors have published research works about coordination in humanitarian supply chain, most of the proposals are conceptual research, leaving applied research as future work.

2.1.3 Performance metrics

Performance measurement is considered as a “*set of metrics used to quantify the functioning and as the reporting process that gives feedback on the outcome of the actions*” (Franco-Santos, et al., 2007). In recent humanitarian logistics’ contributions, some authors have tried to fit the already developed business logistics performance metrics to the humanitarian supply chain, although this has been a difficult task due to differences between the supply chains (business and humanitarian).

Some of the relevant contributions about performance metrics in humanitarian logistics are following presented. Huang et al., (2011) used the efficiency key performance to evaluate the cost-effectiveness of the coordination mechanism. Huang et al., (2012) presented three performance metrics for the relief distribution, efficiency, efficacy and equity. The development of a performance metrics framework considering the key stakeholders of the logistics departments and a literature review, were presented by Schiffing & Piecyk (2014). D’Haene et al., (2015) shown a literature review where a measurement based on service level have become the focus of already developed frameworks. Pettit et al., (2007) provided a literature review and a discussion about to apply commercial supply chains’ Critical Success Factors to humanitarian logistics. L’Hermitte et al., (2015) proposed the concept “*agility*” to be considered as a characteristic that must be evaluated in a supply chain. Hong et al., (2015) presented a framework to generate a more balanced emergency relief supply chain. Finally, Haavisto & Goentzel (2015) presented an analysis about how the performance concept is understood and how it can be measured in a humanitarian supply chain.

From the literature review can be concluded that in recent years there is observed an increased interest on the development of metrics to evaluate the performance of humanitarian supply chain. The application of these metrics in the humanitarian decision making process, remains as a challenge, and specifically to translate the decisions makers experience into a quantify model that allows a support to make quick and efficient decisions.

3. METHODOLOGY DESIGN

As mentioned before, the importance of coordination between humanitarian supply chain’s stakeholders relies in the lack of efficiency and double effort when a poor coordination exists. Even if humanitarian logistics’ experts take decisions under uncertainty and a short time scenario, they must include the different stakeholders’ priorities. Coordination between the involved actors is a key factor to offer an efficient relief distribution. Consider the involved stakeholders’ preferences in the decision making process must be applied in order to balance the final decision according the encompassed organizations’ priorities. Decisions problems that involves ranking, choice and sorting preferences are usually complex. Most of the time, there is no perfect option to suit all the criteria simultaneously, but we can deal with a good option that consider all them.

In order to identify, prioritize and translate the most preferred objectives in humanitarian supply chain from qualitative into quantitative forms, a vertical coordination multi-criteria framework methodology is developed. Based on three main stages, the methodology is developed as follows (Figure 2). First, the vertical coordination structure is defined, and the stakeholders' goals are presented. In the second phase, the performance criteria are identified. Finally, the performance criteria's priorities according each stakeholder's vertical coordination chain are defined through an extensive literature review, in order to balance the vertical coordination chain actor's preferences.

3.1 Methodology application

3.1.1 Step 1: Vertical coordination structure definition

In this step, the definition of the humanitarian logistics' vertical coordination structure is identified. In order to identify each stakeholders' priorities, the profile of each one is determined.

After an extensive literature review and interviews with NGOs and governmental organizations, the vertical coordination was stated as shown in Figure 3 (Akhtar, et al., 2012; Moshtari & Goncalves, 2011). Based on the vertical coordination structure and the interviews, the responsibilities were established as presented in Table 1 (Balcik, et al., 2010). Throughout an extensive literature review, the goals of each vertical coordination level were linked to their responsibilities, as shown in Table 2.

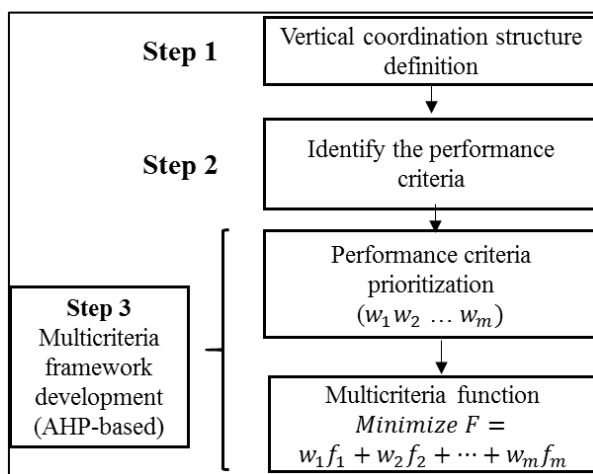


Figure 2. Multi-criteria framework methodology

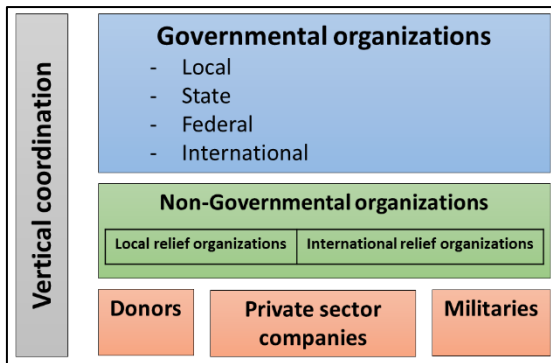


Figure 3. Vertical coordination

Table 1. Vertical coordination stakeholders' responsibilities

| Vertical coordination level | Responsibilities |
|------------------------------------|--|
| Governmental organizations | The coordination among the actors involved in the disaster relief. |
| Non-governmental organizations | Relief aid (food, water, and health care) supply. |
| Private sector companies Donors | Share financial or in-kind donations, transportation, resources (physical and knowledge). |
| Military | Security; transportation and logistics; construction and repair; command, control and communications; medical care; specialized units; and preparedness. |

Table 2. Vertical coordination stakeholders' goals

| Vertical coordination level | Goals |
|------------------------------------|--|
| Governmental organizations | To minimize the coordination's costs . |
| Non-governmental organizations | To deliver aid to affected areas considering a maximum coverage and equity . |
| Private sector companies Donors | To help actors in an efficient manner. |
| Military | Reliability and the aid delivering time . |

3.1.2 Step 2: Performance criteria definition

In contrast with commercial supply chains goal (costs minimization), time delivery minimization and fair aid distribution maximization to beneficiaries in humanitarian operations are the main objectives. In order to establish goals, in humanitarian logistics, two first profiles can be identified: egalitarian and utilitarian (Torre et al., 2012). Egalitarian profile pursues to maximize the delivery quantity or minimize the response time, considering an equal weight for meeting needs of different target populations. By other side, utilitarian profile's goal is to minimize the weighted unmet demand, which considers people with higher priorities. Although the minimization of the costs (financial, human, technical and

material resources) is not the main objective when NGOs decision makers have to decide where, how and with which resources the aid will be delivered, costs is one of the metrics considered to evaluate a supply chain. This measure usually evaluates how the inputs are converted into outputs, and in literature it is better known as efficiency, and will be considered as a third profile in humanitarian logistics.

The Development Assistance Committee (DAC) (Huang et al., 2012 and Davidson, 2006) already defined several humanitarian relief distribution performance metrics, where: *efficiency*, *demand coverage*, *equity* in satisfied demand, *efficacy* and *reliability*, are considered the ones with more impact in the humanitarian supply chain. In order to link the humanitarian logistics' profiles and the performance criteria, a further performance criteria' concepts review is presented in the following paragraph.

Based on the literature review, the *utilitarian profile* usually measures the *demand coverage* or *equity* criteria, where for this paper purpose, the first one is focused on the need to reach the major population groups facing life-threatening risk wherever they are; and the second one measures the comparable aid delivery to each population given their priorities. The *egalitarian profile* measures the *efficacy* and the *reliability* of the aid delivery. The *efficiency* is usually represented as the time it takes to achieve the aid delivery goal considering a quick and adequate response. The *reliability* concerns to what is planned versus the real, in terms of response time and delivered relief quantity, most times considering the network availability. Finally, the rate how the inputs are converted to outputs, is generally known as *efficiency*, and it is strongly related with the costs (financial, human, technical and material resources).

Using the latest profiles and performance criteria, the classification can be represented as Figure 4. Once the performance criteria are assigned to a humanitarian logistics' profile, the analysis for the vertical coordination stakeholders' preferences are defined under an exhaustive literature review (Step 3).

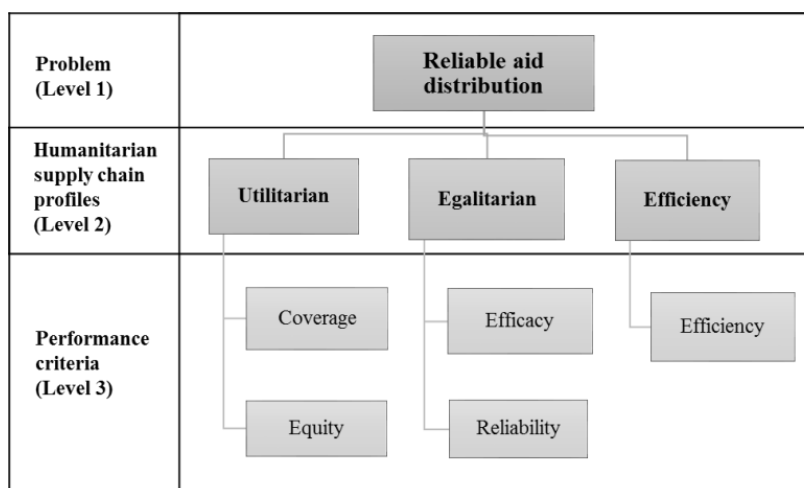


Figure 4. Reliable aid distribution problem structuring

3.1.3 Step 3: Multi-criteria framework development (AHP-Based)

Several research work have been presented to identify the performance metrics each stakeholder pursue. In order to relate the vertical coordination stakeholders to a profile, an extensive literature review was made. The literature review shows a marked relationship between *efficiency* and the *private sector / donors*; *utilitarian profile* with NGOs and *egalitarian profile* with the military organism and NGOs (Table 3).

A further classification shows that the 15% of the research work reviewed in this paper deals with the *government* as a stakeholder. The 35% of the papers focuses on the *military* contribution in the humanitarian supply chain. Finally, the 60% and the 90% deal with *Private sector/Donors* and *NGOs*, respectively.

Table 3. Stakeholders' performance metrics in literature

| Profile | Criteria | Government | NGO | Private Sector/ Donors | Military |
|--------------------|-------------------|--|--|---|---------------------------|
| Efficiency | Efficiency | Akhtar et al., 2012; McLachlin & Larson, 2011 | Tatham & Kovacs, 2010; Tomasini & Van Wassenhove, 2009 | Balland, 2013; Cozzolino, 2012; Egan, 2010; G. Heaslip, 2013; G. E. Heaslip, 2012; Hovhanessian, 2012; Y. Huang, et al., 2011; Moshtari & Goncalves, 2011; Scholten, et al., 2010; Tomasini & Van Wassenhove, 2009 | Barbarosolu, et al., 2002 |
| Utilitarian | Coverage | | Cozzolino, 2012; G. Heaslip, 2013; G. Heaslip & Barber, 2014; G. E. Heaslip, 2012; Hovhanessian, 2012; Kovács & Spens, 2007; McLachlin & Larson, 2011; S J Pettit, et al., 2007) | Balland, 2013 | Barbarosolu, al., 2002 |

| Profile | Criteria | Government | NGO | Private Sector/ Donors | Military |
|--------------------|-----------------|--|--|---|-----------------|
| | Equity | | Balland, 2013; G. Heaslip, 2013; G. E. Heaslip, 2012; McLachlin & Larson, 2011 | | |
| Egalitarian | Efficacy | Balland, 2013 McLachlin & Larson, 2011 | Balland, 2013; Cozzolino, 2012; Dolinskaya et al., 2011; Egan, 2010 G. Heaslip, 2013; Hovhanessian, 2012; Kovács & Spens, 2007; McLachlin & Larson, 2011; Moshtari & Goncalves, 2011; J Pettit et al., 2007; Scholten et al., 2010; Schulz & Blecken, 2010; Tatham & Kovacs, 2010; Tomasini & Van Wassenhove, 2009; Tzeng, et al., 2007 | Balland, 2013; G. Heaslip, 2013; Kovács & Spens, 2007; McLachlin & Larson, 2011; Tomasini & Van Wassenhove, 2009 | |

| Profile | Criteria | Government | NGO | Private Sector/ Donors | Military |
|---------|--------------------|---------------|---|---------------------------|---|
| | Reliability | Balland, 2013 | Balland, 2013; Y. Huang et al., 2011 | | Barbarosolu, al., 2002; G. Heaslip, 2013; G. Heaslip & Barber, 2014; G. E. Heaslip 2012; Kovács & Spens, 2007; McLachlin & Larson, 2011; S J Pettit, et al., 2007 |

3.1.3.1 Applying AHP method to quantify preferences

The AHP (Analytic Hierarchy Process) is a Multi Criteria Decision Making technique based on the “divide and conquer”. This method assesses relative importance of criteria and alternatives, and its main characteristic is the subjective judgement translation into relative weights of importance.

The problem targeted by this work focuses on the decisions made in the aftermath of a disaster regarding a reliable aid distribution, due the importance of the uncertainty and variability of the damages suffered in the routes and infrastructures.

The reliability of a route is one of the main variables when a vehicle routing is planned, due to the impact it has on the departure and delivery time, which in humanitarian logistics case, becomes a death or live factor. To increase the whole network reliability under uncertainties scenarios is a challenge that must be considered in order to minimize deaths, injured persons and suffering of the affected population.

In this work, we deal with five performance criteria, which consider the economic, egalitarian and utilitarian humanitarian logistics’ aspects. A multi-criteria framework for a reliable aid distribution is developed.

Considering the “problem structure” presented in Figure 4 and using the AHP, the each performance indicators’ weights are calculated. Based on the literature review and the quantity of research work already published, the priority that research works shows to the

study of each performance indicators related with the different humanitarian logistics' stakeholders, allow us to rank the importance each actor gives to each criteria.

4. RESULTS

Using the pair wise comparison, the relative importance of the performance criteria over another can be expressed; also, the importance of each alternative with respect to one specific stakeholder can be determined. Resulting in Table 4 and 5.

Computing the eigen-vector determines the relative ranking of the performance criterion under each stakeholder. The obtained priorities for each performance criteria resulted as follows: 32.53% for *efficiency*, 13.65% related to *coverage*, 11.59% for *equity*, 15.14% for *efficacy*, and 27.09% for the *reliability* criteria.

Then, the efficiency resulted to be the performance criteria with the highest priority. The reliability criteria is the second most important, and the efficacy, coverage and equity, the third, fourth and fifth ones, respectively.

The five performance indicators (efficiency, coverage, equity, efficacy and reliability), will be integrated into a single minimization objective function, whose general form is given by the Equation (1)

$$\text{Min } \alpha * E1 + \beta * C + \gamma * E2 + \delta * E3 + \epsilon * R \quad (1)$$

Where

α : Efficiency (E1) weight

β : Uncovered demand (C) weight

γ : Inequity (E2) weight

δ : Efficacy (E3) weight

ϵ : Risk (R) weight

$$\alpha = 0.3253; \beta = 0.1365; \gamma = 0.1159; \delta = 0.1514; \text{ and } \epsilon = 0.2709.$$

Ensuring, that the sum of all the priorities will be 1 (Equation 2)

$$\alpha + \beta + \gamma + \delta + \epsilon = 1 \quad (2)$$

Leading to Equation 3

$$\text{Min } 0.3253 * E1 + 0.1365 * C + 0.1159 * E2 + 0.1514 * E3 + 0.2709 * R \quad (3)$$

Notice that, in order to formulate a single objective function to be minimized, the coverage and equity performance criteria were translated to uncovered demand and inequity, respectively.

Table 4. Stakeholders' priorities

| Stakeholder | Stakeholder's priority |
|-----------------------|------------------------|
| Government | 7.80% |
| NGO | 46.79% |
| Private Sector/Donors | 27.21% |
| Military | 18.20% |

Table 5. Stakeholders' performance criteria priorities

| Stakeholder | Performance criteria's priorities | | | | |
|-----------------------|-----------------------------------|----------|--------|----------|-------------|
| | Efficiency | Coverage | Equity | Efficacy | Reliability |
| Government | 34.92% | 3.37% | 3.37% | 34.92% | 23.43% |
| NGO | 28.57% | 14.29% | 21.43% | 7.14% | 28.57% |
| Private Sector/Donors | 49.30% | 13.55% | 2.86% | 31.43% | 2.86% |
| Military | 16.58% | 16.58% | 2.87% | 2.87% | 61.10% |

5. CONCLUSIONS AND FUTURE RESEARCH WORK

In this paper the literature review and development of a multi-criteria vertical coordination framework for a reliable aid distribution was presented. The researchers' interest to develop and apply performance metrics in the humanitarian logistics supply chain has increased in recent years, most of them, conceptual works. Inspired by the lack of applied research works in this area, and based on literature review, a multi-criteria vertical coordination framework was proposed. Also, several contributions about optimization models and performance metrics have been presented for many authors, nevertheless, there still being a long distance between them to be applied in the same research work. Performance criteria, such as: efficiency, coverage, equity, efficacy and reliability were considered. The performance criteria prioritization was obtained from an extensive literature review, where a stretch relationship between efficiency and the private sector / donors; coverage, equity and efficacy with NGOs and reliability with military organism can be conclude. Also, a preferences' validation, considering stakeholders interviews is recommended.

To illustrate the applicability of the methodology for a reliable aid distribution considering damaged linkage can be a future research work. Furthermore, a sensitivity analysis that presents the performance of the indicators under different scenarios must be applied.

REFERENCES

- AKHTAR, MARR, & GARNEVSCA. (2012). *Coordination in humanitarian relief chains : chain coordinators*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2(1), 85–103. <http://doi.org/10.1108/20426741211226019>.
- ALTAY, & GREEN. (2006). *OR/MS research in disaster operations management*. European Journal of Operational Research, 175(1), 475–493. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2005.05.016>.
- ANAYA-ARENAS, RUIZ, & RENAUD. (2013). *Models for a fair relief distribution: A network design problem*. Industrial Engineering and Systems Management (IESM), Proceedings of 2013 International Conference on (October), 1–8.
- ANBUUDAYASANKAR, SAFEER, & BALKUMAR. (2012). *Analyzing Transportation and Distribution in Emergency Humanitarian Logistics*. Procedia Engineering, 97, 2248–2258. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.469>.
- BALCIK, BEAMON, KREJCI, MURAMATSU, & RAMIREZ. (2010). *Coordination in humanitarian relief chains: Practices, challenges and opportunities*. International Journal of Production Economics, 126(1), 22–34. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.09.008>.
- BALCIK, BEAMON, & SMILOWITZ. (2008). *Last Mile Distribution in Humanitarian Relief*. Journal of Intelligent Transportation Systems, 12(2), 51–63. <http://doi.org/10.1080/15472450802023329>.
- BALLAND. (2013). *Humanitarian Relief Organizations and Its Relationship with Logistics Service Providers*. Jönköping University.
- BARBAROSOLU, ÖZDAMAR, & ÇEVİK. (2002). *An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations*. European Journal of Operational Research, 140(1), 118–133. [http://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00222-3](http://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00222-3).
- BATTINI, PERETTI, PERSONA, & SGARBOSSA. (2014). *Application of humanitarian last mile distribution model*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 4(1), 131–148. <http://doi.org/10.1108/JHLSCM-01-2013-0001>.
- COZZOLINO. (2012). *Humanitarian Logistics: Cross sector cooperation in disaster relief management*. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-30186-5>.
- D'HAENE, VERLINDE, & MACHARIS. (2015). *Measuring while moving (humanitarian supply chain performance measurement - status of research and current practice)*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 5(2), 146–161.
- DAVIDSON. (2006). *Key Performance Indicators in Humanitarian Logistics by*. Retrieved from http://www.fritzinstitute.org/pdfs/findings/xs_davidson_anne.pdf
- DOLINSKAYA, SHI, & SMILOWITZ. (2011). *Decentralized Approaches to Logistics Coordination in Humanitarian Relief*. In Proceeding of the 2011 Industrial Engineering Research Conference.
- EGAN. (2010). *Private goods and services contracts: Increased emergency response capacity or increased vulnerability?* International Journal of Production Economics, 126(1), 46–56. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.005>.
- EM-DATA. (2015). *Disaster trends*. Retrieved from

http://www.emdat.be/disaster_trends/index.html.

ERGUN, KARAKUS, KESKINOC AK, SWANN, & VILLARREAL. (2010). *Operations research to improve disaster supply chain management*. Encyclopedia of Operations Research and Management Science, 6 (August, 2015), 3802–3810. <http://doi.org/10.1002/9780470400531.eorms0604>.

FRANCO-SANTOS, KENNERLEY, MICHELI, MARTINEZ, MASON, MARR, NEELY. (2007). *Towards a definition of a business performance measurement system*. Article information : To cite this document : International Journal of Operations & Production Management., 27(8), 784–801.

HAAVISTO, & GOENTZEL. (2015). *Measuring humanitarian supply chain performance in a multi-goal context*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 2(3), 300–324. <http://doi.org/10.1108/JHLSCM-11-2013-0041>.

HEASLIP, G. (2013). *Services operations management and humanitarian logistics*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 5(1), 35–60. <http://doi.org/10.1108/20426741311328501>.

HEASLIP, G., & BARBER. (2014). *Using the military in disaster relief: systemising challenges and opportunities*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 4(1), 60–81. <http://doi.org/10.1108/JHLSCM-03-2013-0013>.

HEASLIP, G. E. (2012). *The Logistical Challenges of Coordinating Military and Civilian Agencies in Humanitarian Operations*. Irish Academy of Management Conference, 353(0), 1–31.

HONG, JEONG, & FENG. (2015). *Emergency relief supply chain design and trade-off analysis*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 5(2), 162–187. <http://doi.org/10.1108/JHLSCM-11-2013-0041>.

HOVHANESSIAN. (2012). *Coordination Barriers between Humanitarian Organizations and Commercial Agencies in times of Disaster*. Jönköping International Business School.

HUANG, M., SMILOWITZ, & BALCIK. (2012). *Models for relief routing: Equity, efficiency and efficacy*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 48(1), 2–18. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2011.05.004>.

HUANG, Y., LI, & OMITAOMU. (2011). *Conceptual Supernetwork Model for Coordination Mechanisms in Humanitarian Relief Chain*. In Doolen & Aken (Eds.), Proceedings of the 2011 Industrial Engineering Research Conference.

KABRA, RAMESH, & ARSHINDER. (2015). *Identification and prioritization of coordination barriers in humanitarian supply chain management*. International Journal of Disaster Risk Reduction, 13, 128–138. <http://doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.01.011>.

KOVÁCS, & SPENS. (2007). *Humanitarian logistics in disaster relief operations*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 37(2), 99–114. <http://doi.org/10.1108/09600030710734820>.

L'HERMITTE, BOWLES, TATHAM, & BROOKS. (2015). *An integrated approach to agility humanitarian logistics*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 5(2), 209–2033. <http://doi.org/10.1108/JHLSCM-11-2013-0041>.

LEIRAS, JR, PERES, BERTAZZO, & YOSHIZAKI. (2014). *Literature review of*

- humanitarian logistics research: trends and challenges*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management (Vol. 4). <http://doi.org/10.1108/JHLSCM-04-2012-0008>.
- LIBERATORE, ORTUÑO, TIRADO, VITORIANO, & SCAPARRA. (2014). *A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in Humanitarian Logistics*. Computers and Operations Research, 42, 3–13. <http://doi.org/10.1016/j.cor.2012.03.019>.
- MCLACHLIN, & LARSON. (2011). *Building humanitarian supply chain relationships: lessons from leading practitioners*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 1(1), 32–49.
- MOSHTARI, & GONCALVES. (2011). *Understanding the drivers and barriers of coordination among humanitarian organizations*. In POMS 23rd Annual Conference. Chicago, Illinois, U.S.A.
- NAJI-AZIMI, RENAUD, RUIZ, & SALARI.(2012). *A covering tour approach to the location of satellite distribution centers to supply humanitarian aid*. European Journal of Operational Research, 222(3), 596–605. <http://doi.org/10.1016/j.ejor.2012.05.001>.
- PETTIT, S J, BERESFORD, & DRIVE. (2007). *Emergency relief logistics : an evaluation of military , non-military and composite response models*. International Journal of Logistics Research and Applications : A Leading Journal of Supply Chain Management, 8(4), 313–331. <http://doi.org/10.1080/13675560500407325>.
- RANSIKARBUM, & MASON. (2016). *Multiple-objective analysis of integrated relief supply and network restoration in humanitarian logistics operations*. International Journal of Production Research, 54(1), 49–68. <http://doi.org/10.1080/00207543.2014.977458>.
- REKIK, RUIZ, RENAUD, BERKOUNE, & PAQUET. (2013). *A decision Support System for Humanitarian Network Design and Distribution Operations*. In Humanitarian and Relief Logistics (Vol. 54). <http://doi.org/10.1007/978-1-4614-7007-6>.
- SCHIFFLING, & PIECYK. (2014). *Performance measurement in humanitarian logistics: a customer-oriented approach*. Journal of Humanitarian Logistics and Supply Chain Management, 4(2), 198–221. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1108/JHLSCM-08-2013-0027>.
- SCHOLTEN, SCOTT, & FYNES. (2010). *(Le) agility in humanitarian aid (NGO) supply chains*. International Journal of Physical Distribution Management, 40(8/9), 623–635.
- SCHULZ, & BLECKEN. (2010). *Horizontal cooperation in disaster relief logistics: benefits and impediments*. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 40(8/9), 636–656. <http://doi.org/10.1108/09600031011079300>.
- SUMEET, VINOD, & MENON. (2015). *Managing Humanitarian Logistics*. (Springer, Ed.). Springer.
- TATHAM, & KOVACS. (2010). *The application of “swift trust” to humanitarian logistics*. International Journal of Production Economics, 126(1), 35–45. <http://doi.org/10.1016/j.ijpe.2009.10.006>.
- TOMASINI, & VAN WASSENHOVE. (2009). *From preparedness to partnerships: case study research on humanitarian logistics*. International Transactions in Operational Research, 16(5), 549–559. <http://doi.org/10.1111/j.1475-3995.2009.00697.x>.

TORRE, DOLINSKAYA, & SMILOWITZ. (2012). *Disaster relief routing : Integrating research and practice*. Socio-Economic Planning Sciences, 46(1), 88–97.

TZENG, CHENG, & HUANG. (2007). *Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 43(6), 673–686. <http://doi.org/10.1016/j.tre.2006.10.012>.

VAN WASSENHOVE. (2006). *Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear*. Journal of the Operational Research Society, 57(5), 475–489. <http://doi.org/10.1057/palgrave.jors.2602125>.

VITORIANO, ORTUÑO, & TIRADO. (2009). *HADS, a Goal Programming-Based Humanitarian Aid Distribution System*. Journal of Multi-Criteria Decision Analysis, (16), 55–64. <http://doi.org/10.1002/mcda>.

36 Modelo de empacotamento de suprimentos em veículos para distribuição de ajuda humanitária na última milha

Juliano Souza

Leonardo Varella

Mirian Buss Gonçalves

Universidade Federal de Santa Catarina, Brasil

RESUMO

O objetivo principal na logística humanitária é fornecer uma resposta ágil e efetiva às vítimas de um desastre. Dentre os procedimentos na cadeia de logística humanitária, a distribuição de suprimentos na última milha é o estágio responsável pela entrega de itens aos afetados pelo desastre. Assim, nesse artigo considera-se um procedimento para estimar, refinar e definir demandas quantitativa e qualitativamente, levando em consideração a área impactada e o número de pessoas afetadas; e para que essas demandas sejam atendidas com maior rapidez e de forma otimizada, propõe-se um modelo de carregamento em caminhões com cargas fracionadas com ordem definida de descarregamento, otimizando tempo, espaço e atendimento ágil às vítimas atingidas.

Palavras-chave: Logística Humanitária; Distribuição de Última Milha; Empacotamento

1. INTRODUÇÃO

Eventualmente, condições climáticas ou ações feitas pelo homem geram instabilidade ecológica nas relações entre o homem e seu meio ambiente, resultando muitas vezes em desastres. Os desastres podem ser naturais (terremotos, inundações, furacões) ou gerados pelo homem (ataques terroristas, vazamentos químicos). Em muitos desastres as demandas por ajuda ultrapassam a disponibilidade de recursos e, portanto, é necessário um processo de planejamento e gestão; além disso, espera-se reduzir o tempo de resposta.

Conforme Van Wassenhove (2006), o gerenciamento de desastre pode ser subdividido em quatro fases: Mitigação, Preparação, Resposta e Reconstrução. No presente artigo, consideramos uma etapa que pertence a fase de Resposta; especificamente, na distribuição de itens às vítimas, definida como distribuição de última milha. Segundo Balcik et al., (2008), os suprimentos são enviados de lugares diferentes para uma localidade primária (portos, aeroporto), em seguida enviados para localidades secundárias (grandes armazéns, grandes cidades) onde são armazenados, ordenados, e finalmente enviados a uma terceira localidade, definida como pontos de distribuição local, onde são entregues às vítimas do desastre, como mostra a Figura 1.

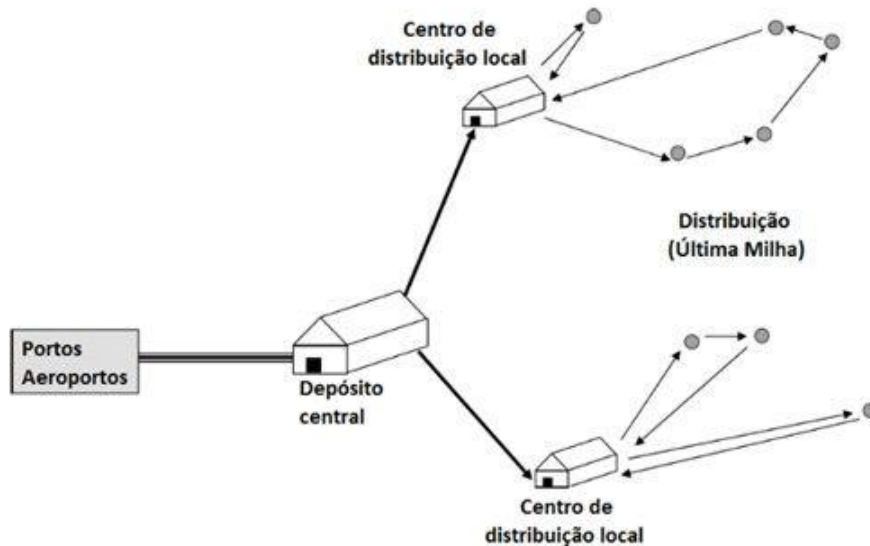


Figura 1. Distribuição na última milha

Fonte: Balcik, 2008

O presente trabalho está organizado da seguinte forma: Estimativa e refinamento da demanda de produtos (seção 2) seguindo as etapas em Costa et al. (2014); modelo matemático de carregamento de caminhões considerando carga fracionada em múltiplos destinos (seção 3). Considera-se que a demanda possa ser estimada quantitativa e qualitativamente, e então propõe-se um modelo de carregamento de cargas fracionadas em um caminhão na distribuição de itens na última milha.

2. ESTIMATIVA DA DEMANDA DE PRODUTOS

Costa et al. (2014) destacam quatro etapas que estabelecem a demanda de produtos e os aspectos operacionais:

- I. O levantamento de necessidades. Conforme PAHO (2000), o tipo de desastre e a quantidade por tipo de suprimento disponível nos estoques nacionais são dois fatores importantes para determinar o tipo e a quantidade necessária. Segundo USAID (1998) e PAHO (2000), é fundamental levantar precisamente as necessidades logísticas e de suprimentos de ajuda, tais como as necessidades da população bem como os estoques disponíveis, ambos após o desastre. Consideram que essas informações são de suma importância no sentido qualitativo; no entanto, situações emergenciais mais urgentes não podem esperar tal avaliação e, portanto, uma resposta rápida deve ser antecipada. Segundo WFP (2004), foi constatada baixa qualidade dessas informações no que se refere à demanda de alimentos, gerando demandas superestimadas.
- II. As características operacionais dos pontos de distribuição de ajuda humanitária instalados para distribuir itens de ajuda (POD, “*Point of distribution*”, conforme

FEMA/USACE (2008)). Considera-se esses pontos como centros de distribuição de última milha, em que é feito o atendimento de uma família por vez e que as pessoas afetadas vão até o ponto de distribuição. Suponha-se que em cada centro haja espaço suficiente para armazenar os suprimentos de ajuda até sua entrega.

- III. Caracterização diária das necessidades diárias de alimentos (Ração). Segundo WFP (2004) e USAID (1998), os alimentos podem ser entregues já preparados ou para preparar.
- IV. Procedimento para estimativa da demanda de produtos e área de armazenamento. Costa et al. (2014) apresentam um cálculo para determinar quantidades de demanda e capacidades de estoque necessárias. Para a estimativa de demandas, utiliza-se o número de habitantes (CENSO) e a área da região atingida; dessa forma obtém-se a densidade demográfica (hab/km²). Portanto, pode-se obter a estimativa do número de pessoas atingidas.

Dessa forma, é possível obter as estimativas de demandas no que se refere à quantificação e qualificação dos itens; logo, pode-se refinar e definir efetivamente e, finalmente, acrescentar às essas etapas o carregamento de tais suprimentos em caminhões (ou contêineres) utilizando um modelo matemático que considera ordem de descarga e minimiza desperdício de espaço nos carregamentos. Observamos que facilmente pode-se acrescentar restrições de limite de peso, estabilidade do carregamento e resistência das caixas ao empilhamento.

3. MODELO MATEMÁTICO DE CARREGAMENTO DE CAMINHÕES CONSIDERANDO CARGA FRACIONADA EM MÚLTIPLOS DESTINOS

PAHO (2000) destaca que nesses pontos de distribuição não há equipamentos que auxiliem na descarga desses itens, portanto, propõe-se o modelo considerando carga fracionada em múltiplos destinos (Junqueira 2009) para ajuda humanitária. Baseado em Junqueira (2009), apresenta-se um modelo em que o caminhão sai do depósito (ou ponto de triagem) carregado com itens de diferentes destinos, onde esses destinos estão dentro de uma região afetada pelo desastre. O caminhão deve então percorrer um roteiro de entrega (conhecido *à priori*) e os itens de ajuda humanitária devem ser descarregados em cada destino até que o caminhão esteja totalmente descarregado e retorne para o depósito. O objetivo nesse modelo é planejar, da melhor forma, carregamentos considerando a ordem de descarregamento para evitar perda de tempo descarregando e recarregando os itens dos destinos restantes. Na Figura 2 pode-se visualizar o procedimento considerando cinco destinos. O caminhão carregado deixa o

depósito e é descarregado ao longo do percurso, retornando vazio.

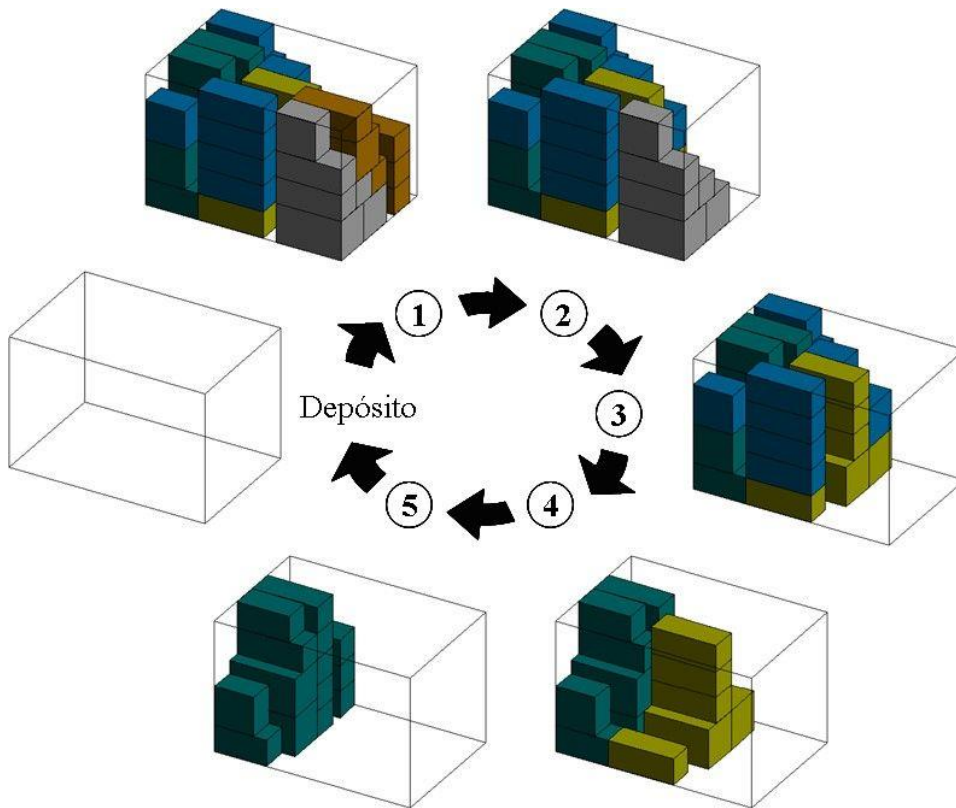


Figura 2. Caminhão sendo descarregado ao longo de cinco destinos

Fonte: Junqueira, 2009

Junqueira (2009) apresenta dois procedimentos heurísticos que envolvem formulações para modelos de carregamento de caminhões, e ambos procedimentos apresentaram bons resultados computacionais. Nesses procedimentos admite-se que o caminhão tem um comprimento L suficientemente grande para empacotar todas as caixas de todos os destinos, ou equivalente, que há à disposição caminhões suficientes para atender a demanda.

3.1 Procedimento 1

Dados $k = 1, \dots, n$ destinos e um caminhão que deve percorrer cada um desses destinos. Para cada destino tem-se m_k tipos de caixas para serem carregadas, cada tipo i ($i = 1, \dots, m_k$) com demanda b_i caixas de dimensões (l_i, w_i, h_i) . Para cada destino k , é possível redefinir as possíveis posições onde cada caixa pode ser colocada, ao longo das dimensões do caminhão (L, W, H) , comprimento L , largura W e altura H por meio dos

conjuntos:

$$X_k = \{p | p = \sum_{i=1}^{m_k} \varepsilon_i \cdot l_i, 0 \leq p \leq L - \min_i(l_i), 0 \leq \varepsilon_i \leq b_i \text{ e } \varepsilon_i \in \mathbb{Z}, i = 1, \dots, m_k\} \quad (1)$$

$$Y_k = \{q | q = \sum_{i=1}^{m_k} \varepsilon_i \cdot w_i, 0 \leq q \leq W - \min_i(w_i), 0 \leq \varepsilon_i \leq b_i \text{ e } \varepsilon_i \in \mathbb{Z}, i = 1, \dots, m_k\} \quad (2)$$

$$Z_k = \{r | r = \sum_{i=1}^{m_k} \varepsilon_i \cdot h_i, 0 \leq r \leq H - \min_i(h_i), 0 \leq \varepsilon_i \leq b_i \text{ e } \varepsilon_i \in \mathbb{Z}, i = 1, \dots, m_k\} \quad (3)$$

Onde:

Para $X_k, Y_k,$ e $Z_k, k = 1, \dots, n.$

p : índice para a posição em relação ao eixo x ;

q : índice para a posição em relação ao eixo y ;

r : índice para a posição em relação ao eixo z .

A partir desses conjuntos define-se ainda os seguintes conjuntos:

$$X_{ik} = \{p \in X_k | 0 \leq p \leq L - l_i\}, i = 1, \dots, m_k, k = 1, \dots, n \quad (4)$$

$$Y_{ik} = \{q \in Y_k | 0 \leq q \leq W - w_i\}, i = 1, \dots, m_k, k = 1, \dots, n \quad (5)$$

$$Z_{ik} = \{r \in Z_k | 0 \leq r \leq H - h_i\}, i = 1, \dots, m_k, k = 1, \dots, n \quad (6)$$

Para cada destino $k,$ define-se a variável de decisão real L'_k ($k = 1, \dots, n$) para o comprimento mínimo necessário para empacotar todas as caixas do destino. Assim, com base na formulação de Junqueira (2009) apresenta uma nova formulação dentro de um procedimento recursivo para cada destino k :

Para $k = 1, \dots, n,$ resolva a formulação (7) – (12)

$$\min_k L'_k \quad (7)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{m_k} \sum_{p \in X_{ik}} \sum_{q \in Y_{ik}} \sum_{r \in Z_{ik}} a_{ipqrstu} \cdot x_{ipqr} \leq 1 \quad s \in X_k, t \in Y_k, u \in Z_k \quad (8)$$

$$\sum_{p \in X_{ik}} \sum_{q \in Y_{ik}} \sum_{r \in Z_{ik}} x_{ipqr} = b_i \quad i = 1, \dots, m_k \quad (9)$$

$$(p + l_i) \cdot x_{ipqr} \leq L'_k \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, m_k \\ p \in X_{ik}, q \in Y_{ik}, r \in Z_{ik} \end{matrix} \quad (10)$$

$$L'_k \geq 0 \quad (11)$$

$$x_{ipqr} \in \{0, 1\} \quad \begin{matrix} i = 1, \dots, m_k \\ p \in X_{ik}, q \in Y_{ik}, r \in Z_{ik} \end{matrix} \quad (12)$$

Retorne $L_1^*, L_2^*, \dots, L_k^*$

Se $L_1^* + L_2^* + \dots + L_k^*$, então a solução é factível

Na formulação (7) - (12), a função objetivo (7) visa minimizar o comprimento total necessário L'_k para empacotar todas as caixas do destino k . As restrições (8) impedem que haja sobreposição entre as caixas do destino k dentro do caminhão, ou seja, uma caixa quando posicionada em (p, q, r) não permite que outra caixa qualquer ocupe a posição (s, t, u) dentro dela. As restrições (9) fazem com que a demanda b_i seja atendida no destino k . As restrições (10) impedem que as caixas do destino k sejam empacotadas além do comprimento mínimo necessário L'_k . Nas restrições (11) - (12) é definido o domínio das variáveis de decisão. Esse procedimento considera k divisórias imaginárias dentro do caminhão como fica ilustrado na Figura 3.

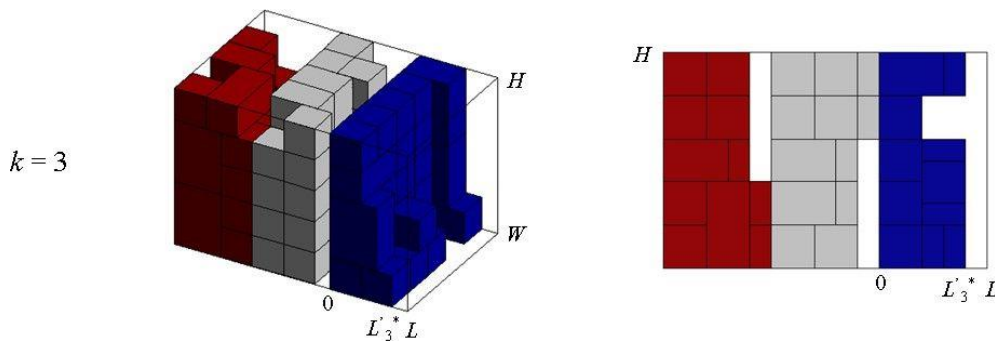


Figura 3. Exemplo de empacotamento das caixas com o Procedimento 1

Fonte: Junqueira, 2009

3.2 Procedimento 2

Analogamente ao Procedimento 1, considera-se $k = 1, \dots, n$ destinos e um caminhão que deve percorrer cada um desses destinos. Para cada destino tem-se m tipos de caixas para serem carregadas, cada tipo i ($i = 1, \dots, m$) com demanda b_{ik} caixas de dimensões (l_i, w_i, h_i) . Para esse procedimento define-se a variável de decisão real L' para empacotar todas as caixas de todos os n destinos. Novamente, com base na formulação de Junqueira (2009)

apresenta uma nova formulação dentro de um procedimento recursivo para cada destino k :

Faça $k = 1$ e resolva a formulação (8) - (14):

$$\min L' \quad (13)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^{m_k} \sum_{p \in X_i} \sum_{q \in Y_i} \sum_{r \in Z_i} a_{ipqrstu} \cdot x_{ipqr} \leq 1 \quad s \in X, t \in Y, u \in Z \quad (14)$$

$$\sum_{p \in X_i} \sum_{q \in Y_i} \sum_{r \in Z_i} x_{ipqr} = \sum_{k'=1}^k b_{ik} \quad i = 1, \dots, m_k \quad (15)$$

$$(p + l_i) \cdot x_{ipqr} \leq L' \quad i = 1, \dots, m_k \quad p \in X_i, q \in Y_i, r \in Z_i \quad (16)$$

$$L'_k \geq 0 \quad (17)$$

$$x_{ipqr} \in \{0, 1\} \quad i = 1, \dots, m_k \quad p \in X_i, q \in Y_i, r \in Z_i \quad (18)$$

Fixe as variáveis $x_{ipqr}^* = 1$ associadas às caixas deste destino.

Faça $k = k + 1$ e resolva o modelo acima em k , com as variáveis x_{ipqr} acima fixadas.

Repita este procedimento para todos os n destinos.

Retorne o último L'^* obtido.

Se $L'^* \leq L$, então a solução é factível.

Na formulação (13) - (18), a função objetivo (13) visa minimizar o comprimento total necessário L' para empacotar todas as caixas de todos os n destinos. As restrições (14) impedem que haja sobreposição entre as caixas do destino k dentro do caminhão, ou seja, uma caixa quando posicionada em (p, q, r) não permite que outra caixa qualquer ocupe a posição (s, t, u) dentro dela. As restrições (15) fazem com que a demanda b_{ik} seja atendida no destino k . As restrições (16) impedem que as caixas do destino k sejam empacotadas além do comprimento mínimo necessário L' . Nas restrições (17) - (18) é definido o domínio das variáveis de decisão. A Figura 4 mostra um exemplo entre as caixas de três destinos consecutivos dentro do caminhão.

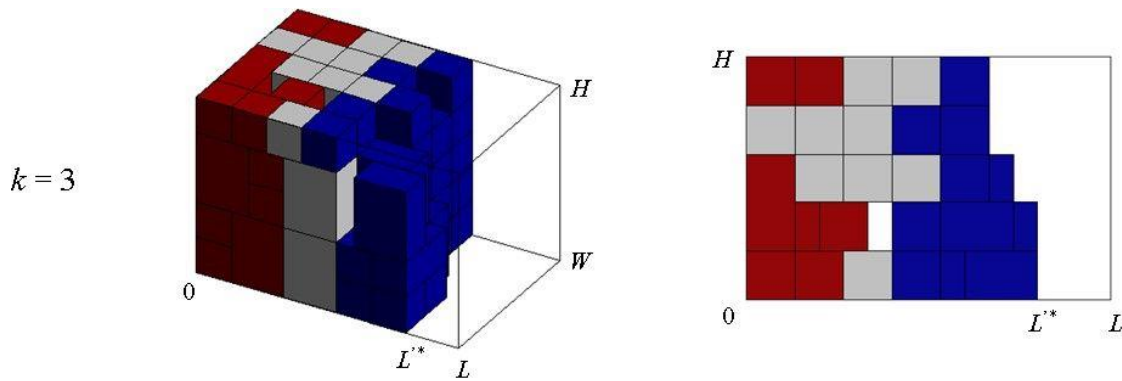


Figura 4. Exemplo de empacotamento das caixas com o Procedimento 2

Fonte: Junqueira, 2009

Note que nesse procedimento, as caixas dos diferentes destinos não têm posicionamento relativo entre si limitado pela maior ordenada $p + l_i$ obtida com as caixas empacotadas de cada destino, pois é possível, por exemplo, que as caixas de um destino posterior sejam colocadas em contato com as caixas de destinos anteriores no roteiro do caminhão.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho, considerou-se um procedimento apresentado para estimativa da demanda por itens de ajuda humanitária. O procedimento considera o tipo de desastre, o tamanho do impacto e dados demográficos da região para que se possa estimar a demanda quantitativamente. Além disso, são apresentados dados nutricionais que permitem possíveis variações na composição de rações, flexibilizando a definição por tipo de alimento.

Uma vez definidas as estimativas quantitativa e qualitativa desses itens pode-se importar esses dados como parâmetros para o modelo de empacotamento com cargas fracionadas. Desse modo, é possível adaptar o modelo de carregamento para distribuição de ajuda humanitária na última milha. Propõe-se para dar continuidade ao modelo uma simulação e/ou um estudo de caso com a finalidade de tornar o modelo mais próximo possível da realidade em desastres.

Para o modelo de carregamento dos itens de ajuda humanitária, foi proposta uma formulação onde as cargas são fracionadas e carregadas de acordo com um roteiro de entrega. Assim, é possível descarregar em um destino sem a necessidade de remanejar cargas de destinos remanescentes. Essa estratégia apresentada facilita as entregas, uma vez que em locais de distribuição, geralmente, não possuem equipamentos de descarga disponíveis.

O modelo pode facilmente ser estendido de modo que podem-se considerar diferentes orientações das caixas dentro do caminhão, limite de peso, estabilidade do carregamento e resistência de cada item. É importante ressaltar que o modelo considera que o roteiro de entrega já é conhecido inicialmente, e, portanto, temos um problema de otimização para cada

destino; assim, ao final, obtém-se uma composição de soluções localmente ótimas. Uma extensão do modelo seria considerar um conjunto de destinos e apresentar uma formulação que otimize o carregamento e de acordo como o melhor roteiro de entrega. A escolha do roteiro e a escolha da forma de carregamento feitas em conjunto pode trazer soluções melhores. Essas propostas poderão ser trabalhadas futuramente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALCIK, B.; BEAMON, B.M.; SMILOWITZ, K. (2008). *Last Mile Distribution*. In: Humanitarian Relief Journal of Intelligent Transportation Systems;12(2):51–63.
- COSTA, S. R. A.; R. A. M. BANDEIRA e V. B. G. CAMPOS (2014). *Pontos de distribuição na logística humanitária: demanda de produtos e aspectos operacionais*. XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em transportes. Curitiba, PR, Brasil.
- FEMA/USACE (2008). *IS-26 Guide to Points of Distribution (PODs)*. Disponível em: <http://training.fema.gov/EMIWeb/IS/is26.asp>. Acesso em 22 de outubro de 2015.
- JUNQUEIRA, L. (2009). *Modelos de programação matemática para problemas de carregamento de caixas dentro de contêineres*. São Carlos: UFSCar.134 p.
- PAN-AMERICAN HEALTH ORGANIZATION, PAHO (2000). *NATURAL DISASTERS: Protecting the Public's Health*. Scientific Publication No. 575 disponível em: http://www.preventionweb.net/files/1913_VL206114.pdf. Acesso em 19 de novembro de 2015.
- U.S. AGENCY FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT, USAID. (1998). *Field Operation Guide for Disaster Assessment and response*. U.S. Agency for International Development Bureau for Humanitarian Response Office of Foreign Disaster Assistance. FOG Version 3.0. August 1998.
- VAN WASSENHOF, L. (2006). *Humanitarian aid logistics: supply chain management in high gear*. Journal of the Operational Research Society. 57, 475-498.
- WORLD FOOD PROGRAMME, WFP. (2004). *Emergency needs assessments*. Policy Issues, Agenda item 4 2004. Disponível em: http://www.wfp.org/policies/Introduction/policy/index.asp?section=6&sub_section=1. Acesso em 16 de novembro de 2015.

37 Controle de multidões em situações de emergência - contribuições dos princípios de logística

João Carlos Souza

Universidade Federal de Santa Catarina - Brasil

RESUMO

Multidões, ou grandes concentrações de pessoas, ocorrem com frequência na sociedade moderna, sendo comum a reunião de grande número de pessoas para participar de eventos esportivos, religiosos, artísticos, políticos, etc. Normalmente, estas grandes concentrações de pessoas acontecem sem maiores problemas. Ocasionalmente pode acontecer uma falha estrutural, ou um fenômeno atmosférico extremo, ou um conflito entre os participantes do evento, ou um incêndio, ou vandalismo, ou algum outro fato inesperado que exija o esvaziamento rápido destes locais. Por uma combinação de instalações, rotas de fuga e sinalização inadequadas e despreparo pessoal dos organizadores, esta evacuação emergencial pode resultar em graves acidentes, levando ferimentos e mortes a muitas pessoas. O objetivo da pesquisa foi estudar como os processos logísticos poderiam colaborar para o controle de multidões em caso de emergência. A meta é avaliar as rotas de fuga e demais itens que possam contribuir para a evacuação segura dos locais de reunião de grande público. Foi dada ênfase aos modelos de acessibilidade espacial, principalmente aqueles ligados a problemas de alerta, orientação espacial e deslocamento rápido e seguro dos usuários. Considerou-se que o planejamento para resposta a situações de emergência deve levar em consideração o menor tempo de resposta possível para que equipes de atendimento emergencial estejam disponíveis para socorrer os indivíduos afetados diretamente pelo desastre. Espera-se contribuir com a formulação de diretrizes para resposta a situações emergenciais envolvendo multidões.

Palavras chave: Logística, Emergências, Multidões.

1. INTRODUÇÃO

Mesmo que cada pessoa tenha personalidade, gostos, modo de agir e modo de pensar individualizados, é característico dos seres humanos viverem, trabalharem e se divertirem em grupo. Em diferentes situações, este grupo pode se ampliar para muitas pessoas, surgindo o que se conhece como multidão. Quando as pessoas reúnem em grandes multidões parece que todas as personalidades individuais se fundem e surge um novo organismo com características e comportamentos próprios.

As emergências podem surgir ou serem provocadas por fenômenos naturais ou em

consequência de atos humanos, tais como terrorismo, vandalismo ou colapso estrutural, e podem gerar uma das formas mais desastrosas do comportamento humano coletivo: a debandada da multidão induzida por um perigo, real ou imaginário; em idioma inglês, esta situação é conhecida como *crowd stamped* ou *mass panic*. Nestes casos, as pessoas alteram completamente seu comportamento habitual, surgindo o indesejado *efeito rebanho*, que pode levar a terríveis consequências, como muitas mortes, ferimentos e prejuízos materiais.

Diversos ambientes são planejados para reunirem um contingente maior de pessoas e até grandes multidões. Por exemplo, edifícios comerciais, terminais de transportes, locais para acontecimentos festivos, esportivos ou religiosos, espetáculos artísticos, etc. A reunião de muitas pessoas nestes ambientes cria a possibilidade de acontecer algum incidente que exija a necessidade de retirar rapidamente os indivíduos que por ali transitam. Para diminuir o risco de morte, ferimentos ou outros danos, as evacuações emergenciais devem ser criteriosamente planejadas, principalmente no que tange à criação de rotas seguras de escape. Isto envolve cuidadosos projetos de arquitetura, engenharia e logística.

Por envolver não só a consideração de restrições físicas, mas também características comportamentais humanas complexas, é um grande desafio planejar e conceber rotas e saídas em locais com grande concentração de público, para que as pessoas ali reunidas possam ser evacuadas de forma segura e tranquila, tanto em situações normais, como em situação de emergência.

1.1 Objetivos

O objetivo da pesquisa foi entender o comportamento coletivo de pessoas que se deslocam em locais de reunião de grande público e estudar como os processos logísticos poderiam colaborar para o controle de multidões em caso de emergência. A meta é avaliar as rotas de fuga e demais itens que possam contribuir para a evacuação segura dos locais de reunião de grande público.

O foco do trabalho tem o intuito de reduzir os riscos de ocorrência de desastres em espaços que comportem multidões e planejar de ações para minimizar suas consequências em caso de emergências. Deu-se prioridade para a preparação de planos de evacuação dos espectadores em direção a áreas controladas, treinamentos especializados para o pessoal da organização, previsão de rotas para circulação de veículos de emergência e de rotas livres de obstáculos para transporte do pessoal de apoio e dos eventuais indivíduos atingidos pelo desastre.

1.2 Comportamento de pedestres em condições normais

Uma multidão não é a mesma coisa que a existência de muitos pedestres em uma rua, praça ou centro comercial. Os pedestres têm interesses e objetivos individuais, sem relação com os das outras pessoas que os rodeiam. Já nas multidões, como será mais bem explicitado nos próximos capítulos, os indivíduos têm algum objetivo em comum. Por isto, os estudos sobre

as dinâmicas das multidões são bem diferente que os modelos para planejamento do fluxo de pedestres.

Em condições normais, o pedestre se move com naturalidade, escolhendo o caminho com base em fatores relacionados aos seus interesses e às peculiaridades do ambiente. Em geral, o comportamento de pedestres é afetado pelas suas características físicas (idade, sexo, estado de saúde, estrutura física, etc.), pelas características do movimento, e pelas características do caminho. Em condições normais, o pedestre sente uma forte aversão a tomar desvios, ou se mover em direção diferente à sua “linha de desejo”. Cada pessoa caminha numa velocidade particular (velocidade do fluxo livre) e mantém certa distância de outros pedestres e de obstáculos físicos.

Os pedestres, ao longo de um fluxo de tráfego, não se comportam de forma uniforme, uma vez que a idade, as condições físicas, os motivos do deslocamento e as diversas formas como as pessoas reagem a estímulos exteriores assim não o permitem. Até mesmo dois fluxos similares, em circunstâncias idênticas, não terão o mesmo comportamento, pois a reação dos pedestres irá variar de acordo com as características locais e os hábitos pessoais. Por esse motivo lidar com o movimento de pessoas é diferente de lidar com qualquer outro fenômeno físico, ainda mais se estes movimentos ocorrem em situações de stress, emergência ou pânico (Quarantelli, 1975).

O fluxo de água num determinado canal ou de um gás numa tubulação com características específicas terá um comportamento totalmente previsível de acordo com as leis da hidráulica e da teoria de fluidos. O mesmo já não acontecerá com um dado fluxo de pessoas circulando em ruas ou em locais fechados, pois irão ter variações de acordo com a localização e o tempo. É este mais um desafio da logística: planejar e conceber rotas e saídas para pessoas reunidas em locais com grande concentração de público possam ser evacuadas, tanto em situações normais como em situação de emergência, de forma segura e tranquila, pois isso envolve não só a consideração de restrições físicas, como também características comportamentais humanas complexas.

Em situações de emergência o comportamento humano tende a ser bem diferente do que o apresentado em condições de normalidade: As pessoas ficam mais nervosas, andam consideravelmente mais rápido do que o normal, os indivíduos começam a se empurrar e as interações entre as pessoas tornam-se frequentes. Os indivíduos aglomeram-se perto de saídas, e pode surgir o fenômeno de arco, representado por muitas pessoas se apertando para passar numa pequena abertura, que se torna quase que uma barreira intransponível. A fuga também é retardada por pessoas caídas ou feridas. Os indivíduos tendem a mostrar comportamento de rebanho, ou seja, fazem o que as outras pessoas fazem e, em situações de fuga, saídas alternativas são muitas vezes esquecidas ou não utilizadas de forma eficiente.

A teoria do pânico lida principalmente com os fatores que podem levar a ocorrência de pânico durante emergências, mesmo que isto não seja comum de ocorrer. A premissa básica

é que, quando as pessoas percebem perigo, suas personalidades conscientes habituais são substituídas por personalidades inconscientes que podem os levar a agir irracionalmente. Entender o comportamento individual de uma pessoa agindo como um pedestre comum já é algo muito complexo. Entender o comportamento num processo de evacuação emergencial se torna ainda mais difícil na medida em que as relações sociais necessitam ser consideradas. Essa dificuldade pode ser a grande responsável pelo desenvolvimento relativamente lento de pesquisas que levam em consideração o comportamento humano. No entanto, essa dificuldade também pode representar um desafio para muitos pesquisadores e atrair suas atenções para esse campo de pesquisa.

A importância do papel da logística no apoio a multidões justifica-se a partir dos grandes desastres ocorridos em estádios esportivos, em casas de espetáculos e em grandes shows e com causas diversas, como brigas, incêndios, quedas de estrutura, atentados terroristas, catástrofes naturais, etc. Por isso a importância de trazer os estudos de logística humanitária juntamente com a arquitetura para um melhor planejamento tanto dos espaços internos como externos, e com isso auxiliar uma melhor resposta a situações de emergência nesses locais.

2. COMPORTAMENTO DE MULTIDÕES EM SITUAÇÃO DE EMERGÊNCIA

Uma multidão pode ser definida como a presença no mesmo local de muitas pessoas com objetivos semelhantes e com densidades nas quais o espaço pessoal, o conforto, a disposição e a liberdade dos indivíduos são influenciados pelos que os rodeiam. Uma multidão não é a mesma coisa que grande número pedestres circulando em uma rua, praça ou centro comercial. Cada pedestre tem interesses e objetivos individuais, sem relação com os das outras pessoas que os rodeiam, já as multidões, quase sempre, tem algum objetivo em comum. Por isto, os estudos sobre as dinâmicas das multidões são similares, mas também apresentam diferenças em relação aos modelos para planejamento do fluxo de pedestres (Blumer, 1969).

Uma das formas mais desastrosas do comportamento humano coletivo é o tipo de debandada ou estouro da multidão induzida pelo pânico de alguns indivíduos, o que pode levar a mortes e graves ferimentos, com pessoas sendo esmagadas ou pisoteadas. Constata-se que, quando as pessoas percebem perigo, suas personalidades conscientes habituais são muitas vezes substituídas por personalidades inconscientes que os levam a agir irracionalmente.

Em condições normais, o pedestre se move com naturalidade, escolhendo o caminho com base em fatores relacionados aos seus interesses e às peculiaridades do ambiente. Em geral, o comportamento de pedestres é afetado pelas suas características físicas, pelas características do movimento e pelas características do caminho. Já o perigo de morte ou ferimentos, e, conseqüentemente, o pânico, pode ser desencadeado por diversos fatores, tais como ameaças naturais (fortes chuvas, raios, enchentes, terremotos, erupções vulcânicas), ou ameaças provocadas pelo homem (incêndios, atentados terroristas, perda do controle

social por parte do estado, etc.). Tumultos também podem surgir aparentemente sem motivo, como durante a corrida compra de produtos em promoção. Em uma situação de emergência sempre há uma sensação de risco iminente e de urgência em agir por parte dos indivíduos.

Para se compreender o pânico em multidões, devem-se levar em consideração alguns fatores:

- Em situações de perigo as pessoas geralmente percebem que sua sobrevivência é produto de tomadas de decisões rápidas;
- A personalidade individual é enfraquecida. Desta forma há uma alteração dos sistemas de valores e uma diminuição da responsabilidade, o que acarreta no comportamento imitativo presente nos grupos;
- Pode haver a presença de palavras de ordem, emblemas, uniformes, manifestações sonoras ou rítmicas que reforçam a identidade grupal, em detrimento da individual;
- As pessoas manifestam um alto grau de irracionalidade, preocupando-se com a ideia de fugir e não considerando as consequências de seus atos.

É difícil descrever as pressões psicológicas e fisiológicas que acontecem dentro de uma multidão com densidade máxima. Em situação de perigo, as forças da multidão podem chegar a níveis quase impossíveis de resistir ou controlar. Quando a densidade multidão é igual ou superior à área do plano do corpo humano, a chamada elipse corporal, em média de $0,25 \text{ m}^2$, o controle individual é praticamente perdido, e a pessoa se torna uma parte involuntária do fluxo. Se a ocupação for de cerca de sete pessoas por metro quadrado, a multidão torna-se quase uma massa fluida. As ondas de choque podem se propagar através da massa de maneira suficiente para elevar algumas pessoas do solo e impulsioná-las a distâncias de 3 metros ou mais.

A intensa pressão da multidão, agravada pela ansiedade, torna difícil o ato de respirar. Ao contrário do que se pensa, a maior parte das mortes em multidões fora de controle acontece devido à asfixia por compressão, e não por *pisoteamento*. Além disto, o calor dos contatos corporais causa debilidade e desmaios. O acesso das pessoas que caem é impossível. Remoção de pessoas em perigo só pode ser realizada puxando-as para cima e passando-as por cima dos demais.

3. ABORDAGENS PARA ANÁLISE DE MOVIMENTAÇÃO DE PEDESTRES

O estudo da dinâmica de pedestres tem sido utilizado em situações que procuram identificar ou reproduzir características do comportamento humano. Quando envolve multidões, esse estudo torna-se ainda mais complexo, visto que as questões associadas à interação dos pedestres também devem ser consideradas.

A necessidade de modelar o tráfego de pedestres tem se tornado uma prioridade em ambientes por onde muitas pessoas necessitam circular. Em função disto, surgiram estudos abrangendo teorias da física e da matemática, que analisam o tráfego de pedestres através de

modelos descritos por equações diferenciais e integro-diferenciais.

Quando a multidão não é muito densa, menos que quatro pessoas por metro quadrado, os indivíduos têm opção para tomarem decisões e podem ir para um lado ou para outro, apresentando movimentos que tem certa semelhança com os de partículas dos gases. Caso a densidade aumente e o espaço seja mais confinado, os movimentos da multidão começam a ser similares aos dos fluidos, e o risco de acidentes começa a crescer.

Inicialmente pensou-se em modelar o comportamento dos pedestres usando-se diretamente alguns conhecimentos consagrados da física, como, por exemplo, a equação de Bernoulli, da dinâmica dos fluidos. Esta equação descreve o comportamento de um fluido que se move ao longo de um tubo ou conduto, e afirma que para um fluxo sem viscosidade um aumento na velocidade do fluido ocorre simultaneamente com uma diminuição na pressão ou uma diminuição na energia potencial do fluido. Imaginou-se que um grande número de pessoas se deslocando em um corredor seria semelhante aos deslocamentos de um líquido no interior de uma tubulação. Ao se depararem com um gargalo, tipo uma porta, este fluxo se submeteria a algo equivalente como um tubo de Venturi. Este é um aparato usado para medir a velocidade do escoamento e a vazão de um líquido incompressível através da variação da pressão durante a passagem deste líquido por um tubo de seção mais larga e depois por outro de seção mais estreita. Este efeito é explicado pelo princípio de Bernoulli e no princípio da continuidade da massa. Se o fluxo de um fluido é constante, mas sua área de escoamento diminui, então necessariamente sua velocidade aumenta. O problema é que, para pessoas se movimentando, não é possível satisfazer as restrições do modelo: escoamento sem viscosidade, escoamento em regime permanente e escoamento incompressível. A tendência natural dos pedestres é produzir o efeito de arco, congestionando as saídas.

Conforme Helbing e Johansson (2010), para não colocar pessoas em risco, quando se pretende simular situações de pânico utilizam-se agentes biológicos, principalmente insetos. Em situação de calma, os animais, em um recipiente apropriado, movem-se normalmente interagindo entre si ou procurando uma saída. Ao se introduzir algum elemento perigoso no recipiente, por exemplo: um chumaço de algodão com inseticida, os insetos entram em pânico e tentam se evadir do ambiente. Mesmo havendo duas ou mais saídas, é comum que quase todos tentem correr para a mesma abertura. Isto demonstra o efeito de imitação que também acontece com os seres humanos; ao ver algumas pessoas se dirigindo para uma determinada direção, os demais tendem a segui-los.

Atualmente, as abordagens mais comuns da análise da movimentação de pedestres são similares às utilizadas para avaliar o de tráfego de veículos: a abordagem macroscópica, que se preocupa em descrever o comportamento das correntes de tráfego de pessoas; a abordagem microscópica, que se interessa pela interação ente dois pedestres consecutivos numa corrente de tráfego; e a abordagem mesoscópica, cujas unidades analisadas são grupamentos de pedestres que se formam nas ruas, praças, centros comerciais, terminais de

transportes, etc.

Segundo Vargas e Gramani (2012), as três escalas têm vantagens e desvantagens, e precisam ser escolhidas dependendo do problema a ser resolvido. Assim, quanto à escala microscópica embora permita uma descrição muito mais precisa do movimento de cada pedestre, requer um grande esforço computacional quando o número considerado de pedestres é muito grande, por exemplo, no caso de multidões (um alto número de indivíduos com características distintas num mesmo ambiente). Já na escala macroscópica, ao contrário da microscópica, a principal vantagem é que se podem usar modelos hidrodinâmicos de primeira ordem, que são de grande simplicidade computacional e rapidez de processamento; entretanto é necessário introduzir uma relação empírica entre a velocidade e a densidade.

3.1 Análises Macroscópicas

As análises macroscópicas do tráfego baseiam-se na consideração de que as correntes de tráfego são meios contínuos, na qual o fluxo de pedestres é comparado ao fluxo de um fluido. Para estudar seu comportamento, a abordagem macroscópica lança mão da aplicação das leis da hidrodinâmica, motivo pelo qual a abordagem é conhecida também como Analogia Hidrodinâmica do Tráfego.

Como as características do tráfego variam no tempo e no espaço, os estudos costumam adotar valores médios, sendo que estas médias podem ser temporais ou espaciais; ou seja, nesta escala, o estado do sistema é descrito por quantidades médias localmente calculadas; ou seja, a densidade, a velocidade e o fluxo dos pedestres são considerados como variáveis dependentes do tempo e do espaço.

O *fluxo* ou *volume* é o número de pedestres que passam por uma seção da pista por unidade de tempo. A unidade de comprimento deve ser considerada como a largura do passeio ou porção da pista. Em geral, usa-se *ped/m/s* no sistema internacional (SI). O fluxo de pedestre, também chamado de volume de pedestres, é representado pela variável q . Segundo a analogia hidrodinâmica, o fluxo corresponde à vazão de um fluido dentro de um duto. Durante um intervalo de tempo t são contados os $n(x)$ pedestres que cruzem a seção.

$$q(x) = \frac{n(x)}{t} \quad (1)$$

A *concentração*, também chamada de *massa específica* ou *densidade relativa* e representada por ρ , é uma grandeza espacial, significando o número de veículos presentes numa determinada extensão x de via. No caso de pessoas, é o número de pedestres por unidade de área. Na analogia hidrodinâmica, a concentração corresponde à densidade do fluido. Por isso mesmo, em se tratando de tráfego, a concentração de pessoas é também chamada de densidade. Pode-se imaginar que, numa seção da via, num determinado instante t , uma fotografia é tirada, e nela é possível contar os n pedestres que se encontram naquele trecho de via. A concentração $\rho(t)$, em *ped/m* é dada pela expressão:

$$\rho(t) = \frac{n(t)}{x} \quad (2)$$

A *velocidade*, no estudo de pedestres, é adotada como uma média das velocidades dos pedestres que passam em um determinado intervalo de tempo. Normalmente é expressa no sistema internacional (SI) em *m/s* e denotada por *u*.

$$u = \frac{q}{\rho} \quad (3)$$

Essas três variáveis, densidade relativa, velocidade e fluxo, são relacionadas através de uma equação conhecida como a *equação fundamental do tráfego*, também válida para o fluxo de pedestres.

$$q(t, x) = u(t, x)\rho(t, x) \quad (4)$$

A curva da relação velocidade-concentração sugerida pelos teóricos que primeiro estudaram a relação entre estas variáveis macroscópicas do tráfego está representada na Figura 1.

Conforme Vargas e Gramani (2012), a teoria para o fluxo de pedestres é assumida para valores de $\rho \leq 6 \text{ ped}/\text{m}^2$, devido à impossibilidade física de se alocar um número maior do que esse por metro quadrado. Desta forma, as ilustrações dos resultados nas Figures 2(a) e 2(b) seguem esse padrão. Analisando a curva que representa o fluxo, quando a densidade ρ fica maior do que a densidade crítica, o fluxo diminui, aproximando-se de zero quando

$$\rho = \rho_j: \rho_{crit} = 2 \text{ ped}/\text{m}^2 (\rho_{crit} \leq \rho \leq \rho_j \text{ com } \rho_j = 4 \text{ ped}/\text{m}^2)$$

O fluxo no trecho em que $\rho > 3,7$, e $\rho \leq \rho_j$ é pequeno, entretanto ainda existe. Ao se atingir $\rho_j = 4 \text{ ped}/\text{m}^2$, tem-se que a densidade é máxima, porém nota-se na Fig. 2(a) que a velocidade para $\rho_j = 4 \text{ ped}/\text{m}^2$ é mínima, e sendo assim, o fluxo é mínimo.

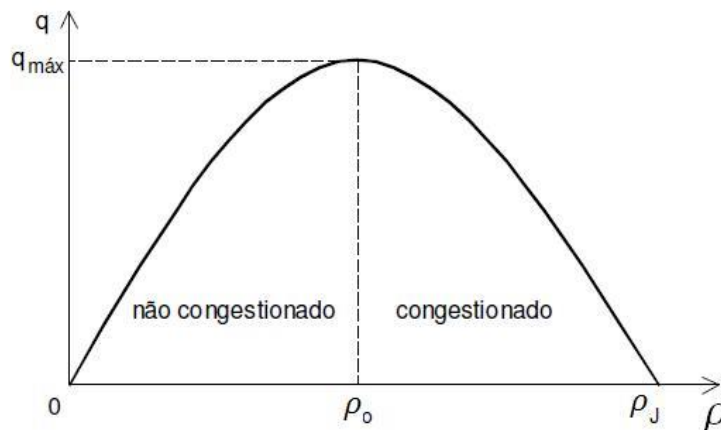


Figura 1. Diagrama clássico representando a relação fluxo-concentração

Fonte: Autor

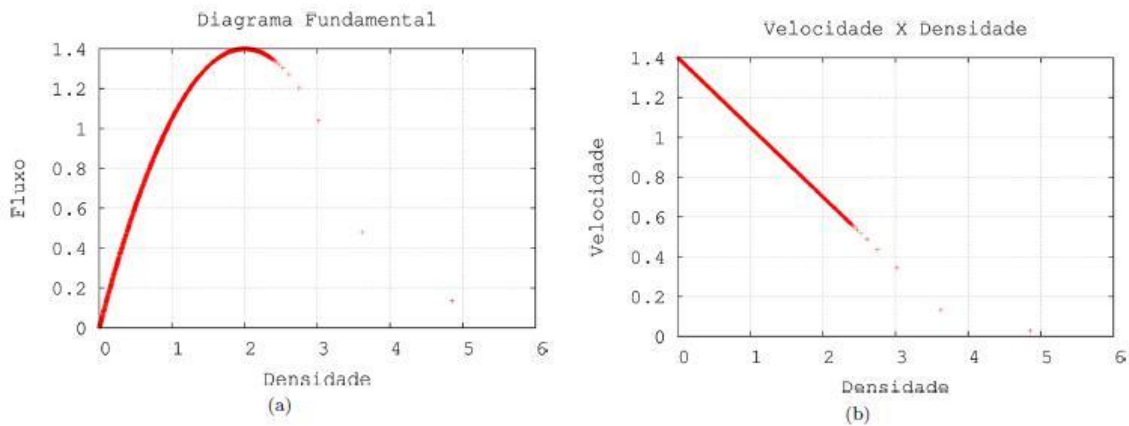


Figura 2. Diagrama fundamental do fluxo

Fonte: Vargas, 2012

3.2 Análise Microscópica

Modelos microscópicos tratam cada pedestre em uma multidão como um agente individual que ocupa um determinado espaço em um instante no tempo. Estes modelos podem fornecer informações valiosas sobre uma vasta gama de características comportamentais. Os modelos microscópicos consideram os fatores que conduzem pedestres para o destino, e também consideram as interações entre as pessoas. Esses modelos dão uma representação mais realista dos movimentos de pedestres.

A posição e a velocidade de cada pedestre definem o estado do sistema como variáveis dependentes do tempo. Equações diferenciais ordinárias representando as leis da mecânica newtoniana são ferramentas para representação dos modelos referentes a essa escala. Incluso nessa escala, os modelos baseados em agentes, que utilizam conceitos de autômatos celulares via método Monte Carlo, tem trazido excelentes resultados quando se modela a dinâmica de multidões.

Existem muitos fatores que precisam ser abordados pelos modelos microscópicos para simular o comportamento de pedestres em condições de emergência. A incorporação de características microscópicas individuais como idade, sexo, variação na velocidade de caminhada, etc., e os fatores ambientais são uma prioridade para previsões realistas possam ser realizadas. No entanto, existem problemas de manipulabilidade analítica e esforço computacional e custo.

Normalmente são utilizados modelos de simulação para se produzir análises microscópicas; isto porque, além de ser difícil a modelagem matemática, podem ser atribuídas aos indivíduos variáveis de decisão adicionais. Os componentes sócio-psicológicos individuais durante as condições de pânico ou de emergência necessitam ser adequadamente tratados. Embora talvez não seja possível representar todos os fatores associados com o pânico em um modelo, os pesquisadores se esforçam para representar os fatores dominantes.

3.3 Análise Mesoscópica

Na escala cinética ou mesoscópica, a identificação dos pedestres não é feita de forma individual, mas sim através de uma distribuição apropriada da probabilidade sobre o estado microscópico considerado como uma variável aleatória. As equações integro-diferenciais são base dos modelos referentes a essa escala. Quando usada para análise do tráfego de veículos, a modelagem mesoscópica não se concentra em um só veículo, mas considera grupos de veículos em um ambiente idêntico. Por exemplo, onde há a mesma velocidade para todos os veículos na mesma seção da estrada, isso poderia ser considerado um grupo ou pelotão.

A ideia de analisar grupos de indivíduos com características similares foi adaptada para estudo de modelos de fluxo de pedestres. Em vez de modelar o comportamento de um único pedestre, são considerados grupos de indivíduos, e cada grupo tem as suas próprias regras de comportamento. Os principais componentes do modelo são grupos de pedestres e uma rede abstrata para representar o meio ambiente. Os grupos se movem através de uma rede que consiste em nós e links. Técnicas de modelagem mesoscópica tem aplicação específica, especialmente para o fluxo de pedestres em tempo real, para determinar o atraso e congestionamento nas áreas públicas.

3.4 Resultados

As dinâmicas de multidões incluem as relações entre densidade da multidão, velocidade do andar, taxas de fluxo da multidão e conforto. Inclui também outros fatores que influenciam o movimento e comportamento de uma multidão, como o conhecimento do local por parte dos visitantes e a informação que lhes é fornecida, bem como o seu perfil demográfico. O comportamento também pode ser influenciado por fatores externos, como o tempo. Essas considerações devem ser tomadas em conta ao conceber e planejar eventos ou espaços de multidões.

Os elementos importantes para evacuação são as portas e os corredores de acesso, e as suas dimensões. Segundo alguns autores (Peschl, 1971), a largura da porta de 1 metro é suficiente para que pelo menos 135 pessoas saiam por minuto durante o processo de escape seguro; este valor representa 2,25 p/m/s (pessoas por metro por segundo), mas é válido apenas para condições normais. Este número foi discutido durante muitos anos, e os Corpos de Bombeiros sugerem que se adote um valor menor, de 63 a 100 pessoas, por metro, por minuto (1,03 p/m/s e 1,67 p/m/s), em função de possível estado de pânico com aumento da velocidade do movimento das pessoas, gerando o efeito de arco.

As capacidades encontradas variam entre 1,03 p/m/s e 1,67 p/m/s, menos do que as diretrizes de concepção (2,25 p/m/s); Daamen e Hoogendoorn (2010) sugere que se adotem para portas e para assim evitar os efeitos de possíveis gargalos. Em muitos estudos, inclusive nas normas de prevenção contra incêndio do estado de Santa Catarina, o tamanho de portas tem sido descrito em termos de “módulos” (um módulo = 0,6 metros). Estes módulos também são

conhecidos como *unidades de passagem*. A largura de cada corredor, passarela, porta ou do portão deve sempre ser um múltiplo do módulo.

4. CONCLUSÃO

Entender o comportamento individual de um pedestre comum já é algo complicado. Entender o comportamento de uma multidão num processo emergencial se torna algo ainda mais complexo na medida em que as relações sociais são consideradas. Essa dificuldade pode ser a grande responsável pelo desenvolvimento relativamente lento de pesquisas que levam em consideração o comportamento humano. No entanto, essa dificuldade também pode representar um desafio para muitos pesquisadores e que deve ser enfrentado. Dentre os possíveis comportamentos que emergem nas pesquisas destacam-se os seguintes:

- Fenômeno de seguir com a multidão. Também conhecido como comportamento de manada, esse fenômeno é caracterizado pelo fato de alguém desistir de seu próprio raciocínio para seguir as ações da maioria a sua volta. Esse fenômeno é frequentemente observado em um processo de evacuação real. Durante uma saída emergencial as pessoas podem perder a calma e a noção da localização de saídas seguras (principalmente em caso de incêndio em que a visibilidade é baixa) e tendem a seguir outras na esperança de que elas conheçam a localização das saídas. As pessoas que têm uma tendência severa de ir com a multidão podem ser facilmente influenciadas por outras pessoas ao seu redor.
- Fenômeno de reunião. Durante esse fenômeno as pessoas apresentam a característica de prevenção, ou seja, sentem que podem se proteger, psicologicamente, negando situações desagradáveis, e estão dispostas a permanecer próximas à multidão em uma emergência; o que pode resultar em recolhimento dos ocupantes no interior do edifício. O efeito das pessoas se ajudarem mutuamente em casos de emergência é conhecido como efeitos de grupo.
- Retrocesso. Pode ser entendido como o fato de retornar ao local de perigo para tentar salvar pertences, em busca de parentes ou até mesmo para informar ou ajudar outras pessoas.
- Comportamento de parentesco. Comportamento muito popular durante a evacuação. É caracterizado pelo fato de que familiares tendem a se reunir durante uma evacuação de emergência ou até mesmo a retroceder ao local de perigo para salvar um membro da família.
- Arqueamento. Fenômeno reproduzido na saída. É causado pelo fato de todos os pedestres se moverem em direção à saída, formando um gargalo no fluxo de pedestres, também conhecido como arco de fuga.
- Mais rápido é mais lento. Fenômeno caracterizado pelo fato de que quanto mais rápido as pessoas desejam se mover, mais lenta pode se tornar a evacuação.

- Efeito não aventureiro. A maioria das pessoas costuma usar saídas familiares ao evacuar um ambiente.
- Pânico. Fenômeno caracterizado como uma reação psicológica na qual o indivíduo fica em um estado anormal de ansiedade ou estado comportamental de aceitação ao estímulo de desastre. A reação psicológica causada no desastre pode fazer a capacidade adaptativa e a capacidade de resposta ao ambiente diminuírem em pouco tempo.

É importante salientar que esses são apenas alguns fenômenos e comportamentos que podem ser observados durante uma evacuação. Visto que o foco deste trabalho não foi investigar a psicologia humana, a descrição desses fenômenos serve para mostrar que o conhecimento do comportamento humano desempenha um papel importante no processo de evacuação emergencial e, principalmente, no processo de planejamento e projeto de locais de reunião de grande público. Os estudos empíricos do comportamento de pedestres em condições de emergência fornecem ferramentas valiosas para ajudar os planejadores e gestores de locais de reunião de grande público para analisar e avaliar as precauções de segurança para estes locais, a necessidade de sistemas de informação alternativos para suprir a falta de dados, e a necessidade de incorporar fatores sócio psicológicos nos modelos de evacuação emergencial. Embora não seja possível garantir a segurança ideal, há espaço para usar modelos melhorados para aumentar os níveis de segurança.

Conclui-se que, quando se planeja um evento com grande público, deve ser considerada uma série de atributos de emergência, destacando-se os seguintes:

A existência e a quantidade suficiente de rotas, passagens e portas suficientemente largas para a saída rápida são essenciais para uma evacuação das pessoas de modo calmo e seguro. Por isto, várias saídas de emergência devem ser disponibilizadas em qualquer evento planejado, e estas devem estar livres de obstruções e com sinalização adequada, com especificação e divulgação dos pontos de entrada e pontos de saída de um evento que garantam um fluxo unidirecional de multidão.

Sistemas de informação e orientação bem planejados, com placas, setas e avisos sonoros, tem um grande impacto sobre a dinâmica de evacuação e, conseqüentemente, sobre a segurança. As pessoas deverão ser antecipadamente instruídas e muito bem informadas sobre as rotas e saídas que deverão ser utilizadas em caso de evacuação emergencial; isto evitará o pânico causado pelo desconhecimento sobre como se salvar.

Formação de equipes com administradores e funcionários treinados em controle de multidões é de fundamental importância. Devem estar preparados para fiscalizar os sistemas de prevenção a desastres e orientar as pessoas em situação de emergência. Planos de evacuação do local devem ser conhecidos pelas equipes de apoio. Cada evento que reúna um grande público deve ter um plano próprio para prevenção de incidentes e acidentes, incluindo

a segurança contra incêndios, e que deve ser ativado em caso de um desastre.

O número máximo de participantes do evento deve ser pré-estabelecido, prevenindo-se da superlotação dos estabelecimentos. Um sistema de bilhetagem adequado é garantia de que o limite máximo de pessoas presentes não seja ultrapassado

A previsão de serviços de primeiros socorros médicos em eventos com grande público é um item básico. Esta providência pode reduzir significativamente o número de pacientes que necessitariam de transporte para o hospital, reduzindo o impacto sobre os serviços de ambulâncias. A maioria das lesões e queixas médicas que acontecem em grandes eventos pode ser eficazmente tratada no próprio local, o que reduz o número internações hospitalares.

Os hospitais locais também devem estar envolvidos com o plano de emergência para potenciais desastres em eventos com grande público. Assim como devem ser previstas rotas desimpedidas para a movimentação de ambulância e outros veículos de apoio.

AGRADECIMENTO

Agradecemos o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio para a realização das pesquisas através do Programa Pró-Alertas, edital nº 24/2014.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLUMER, H. (1969). *Symbolic Interactionism: Perspective and Method*. Prentice-Hall. ISBN 0-52-005676-0.

DAAMEN W. Y HOOGENDOORN S. (2010). *Capacity of doors during evacuation conditions*. First International Conference on Evacuation Modeling and Management. Procedia Engineering 3 (2010), 53–66.

HELBING, D. Y JOHANSSON, A. (2010). *Pedestrian, Crowd and Evacuation Dynamics*. Institute for Advanced Study, Collegium Budapest, Hungary.

PESCHL, I. A. S. Z. (1971). *Evacuation capacity of door openings in panic situations*. Bouw, Vol. 26, 62–67.

QUARANTELLI, E. L. (1975). *Panic behavior: Some empirical observations*. American Institute of Architects Conference on Human Response to Tall Buildings.

VARGAS, M. Y GRAMANI, L. (2012). *Modelagem do fluxo de pedestres pela teoria macroscópica*. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 34, n. 4, 4318.

SECCIÓN 7

INGENIERÍA DE TRÁNSITO

TRAFFIC ENGINEERING

38 Microsimulación de peatones en ambientes universitarios

Félix Israel Cabrera Vega

Manuel German Sabino Gonzales

Gabriel Sergio Luis Legua Landeo

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú

RESUMEN

Originalmente, los modelos consideraban a los peatones como si fuesen automóviles, por lo que se utilizaban los parámetros de velocidad, densidad y nivel de servicio. Actualmente, a través de la micro simulación se les representa como una entidad independiente con características propias, pero poco se ha analizado sobre la interacción sociopsicológica que se produce entre éstos cuando se desplazan en grupo, y sobre los patrones espaciales que determinan. Frente a estos requerimientos, se realiza un estudio empírico del comportamiento peatonal en una vía de la Pontificia Universidad Católica del Perú; además, se utiliza un dron y se elabora un modelo en el simulador VISWALK.

Los resultados del estudio indican que el 65% de los peatones se desplaza en grupo y que las velocidades medias de los hombres y mujeres serían similares. Además, a medida que aumenta el número de integrantes en los grupos, la velocidad media disminuye y se observa una relación lineal entre ellas. También, la proporción del tamaño de los grupos seguiría una distribución de Poisson truncada y se detectan patrones típicos de organización espacial que dependen de la densidad. El modelo en VISWALK representaría adecuadamente las condiciones agregadas y a los ciudadanos sin autonomía, pero el simulador no consideraría en forma directa a los grupos peatonales ni al número de sus integrantes. Finalmente, serían mayores las ventajas de usar un dron para recolectar información, pero su principal debilidad sería la corta duración de las baterías (10 minutos) y su inestabilidad ante las fuertes corrientes de aire.

Palabras Claves: micro simulación peatonal, fuerza social, dron.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de las dinámicas peatonales se ha desarrollado recientemente desde la perspectiva de diferentes disciplinas (Sumpter, 2006; Ball, 2004), debido a que éstas necesitan ser conocidas para optimizar el diseño de la infraestructura, innovar la gestión de tránsito y potenciar la seguridad de los peatones durante el desarrollo de eventos cotidianos, masivos y de evacuación (Moussaid et al., 2010).

Comúnmente, el diseño de la infraestructura peatonal se ha basado en los criterios de

circulación, niveles de servicio (Fruin, 1971) y en modelos macroscópicos que consideran a los peatones como si fuesen vehículos, gases o fluidos (Helbing, 1991; Henderson, 1974). Sin embargo, bajo el enfoque operacional esto ha sido criticado, ya que el espacio público diseñado bajo estos criterios no correspondería a las características y necesidades de los peatones, quienes realmente son entidades que interactúan entre sí y con el entorno (Gehl, 2010). Por ello, actualmente se emplean con mayor frecuencia, los modelos de micro simulación para representar el comportamiento de cada peatón.

La conducta de los peatones depende de diversos factores como la edad, el género, la densidad, el propósito del viaje y principalmente, el desplazamiento individual o grupal (Buchmueller y Weidmann, 2006; Fitzpatrick et al., 2006). Además, una gran diversidad de estudios se han enfocado en el peatón como un individuo aislado -con su propia velocidad y dirección de movimiento- (Moussaïd et al., 2009; Yu y Johansson, 2007), pero son pocos los que han considerado la interacción socio-psicológica entre los peatones cuando se desplazan en grupo (Federici et al., 2014). Frente a estos requerimientos, los estudios empíricos del comportamiento peatonal podrían contribuir a comprender mejor este fenómeno y, de esta manera, extender el alcance de los modelos de micro simulación.

En esta investigación se analizan empíricamente las características peatonales en un tramo de 80 m de longitud de la vía peatonal del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP). El flujo peatonal analizado corresponde a una situación de densidad baja-media y los desplazamientos se producen en condiciones normales (sin pánico). En este estudio, el término grupo se refiere esencialmente, a aquellos individuos que intencionalmente caminan juntos como amigos. Además, se modelan estos desplazamientos mediante el simulador de micro simulación VISWALK, que está basado en el concepto de la fuerza social; finalmente, toda la información necesaria para el estudio se obtiene mediante el uso de un dron (Phanton 2) y video cámaras.

1.1 Objetivos

En esta investigación se tienen los siguientes objetivos: realizar un estudio empírico de las características del desplazamiento peatonal en la vía principal de la PUCP, evaluar si VISWALK 8 puede representar las actividades de estancia, desplazamientos de peatones en grupos y personas sin autonomía (con alguna discapacidad física o cognitiva) y finalmente, analizar las ventajas y desventajas de recolectar información cualitativa y cuantitativa mediante el uso de drones y video cámaras.

2. MICROSIMULACIÓN PEATONAL

Los desplazamientos de los peatones se analizan comúnmente teniendo en cuenta tres niveles de comportamiento: nivel estratégico, nivel táctico y nivel operacional (Hoogendoorn et al., 2001; Schadschneider et al., 2008). En los dos primeros se considera la planificación y la información necesaria para las decisiones de rutas, mientras que en el tercero, se muestra

cómo los peatones ajustan su dirección para alcanzar sus destinos, es decir, se describen las características dinámicas de su movimiento como la velocidad, la aceleración y la anticipación a la colisión con obstáculos fijos y con peatones que caminan en dirección opuesta.

Dentro del nivel operacional, la micro simulación es empleada con mayor frecuencia por el nivel de detalle alcanzado; de acuerdo con Helbing et al., 2005, existen diferentes modelos de micro simulación peatonal, como el modelo celular del costo-beneficio (Gipps y Marksjo, 1985), el modelo de la fuerza magnética (Okazaki, 1979), el modelo “cellular automata” (Blue y Alder, 2001) y el modelo de la fuerza social (Helbing y Molnar, 1995).

2.1 Modelo de la fuerza social

El concepto de que los cambios en el comportamiento humano son guiados por fuerzas sociales fue propuesto originalmente por Lewin (1951) y adaptado, posteriormente, por Helbing y Molnar (1995) para ser aplicado en la micro simulación peatonal. Este modelo trata de describir la interacción de los peatones con el entorno y otros peatones a través de fuerzas de dirección, atracción y repulsión que están basadas en las leyes de Newton.

La fuerza de dirección incentiva al peatón según su agresividad, a alcanzar su destino siguiendo la ruta más rápida; la fuerza de atracción es generada por elementos como las vitrinas de tiendas y amigos, y la fuerza de repulsión por obstáculos y personas desconocidas. Finalmente, como componente adicional, se consideran fluctuaciones o ruidos para representar el carácter impredecible de los peatones. Por lo tanto, en términos sencillos, la fuerza social resultante (F), que actúa sobre un peatón, se obtiene mediante la siguiente expresión (Ecuación 1).

$$F = f_{dirección} + f_{repulsión} + f_{atracción} + f_{fluctuaciones} \quad (1)$$

Un parámetro importante dentro del modelo y fundamental en el proceso de calibración es el tiempo de reacción, “relaxation time”, (τ). Este parámetro, junto con la velocidad actual y deseada, determina la magnitud de la fuerza de dirección. A mayor valor de τ habrá una menor fuerza de dirección y un comportamiento poco agresivo.

3. METODOLOGÍA

Como se mencionó anteriormente, en esta investigación se analizan empíricamente las características peatonales en un tramo de 80 m de longitud de la vía peatonal del campus de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Esta vía sirve para el desplazamiento en ambos sentidos, tiene 4.5 m de ancho, salvo en dos secciones donde es 3 m, y se conecta con un restaurante, una capilla y una tesorería.

Para el análisis se consideraron dos periodos de una hora, en el mes de agosto del año 2015:

de 12 horas a 13 horas (jueves) y de 10 horas a 11 horas (martes) durante el periodo de clases regulares. En el primer periodo, se realizó la observación empírica y se recolectó toda la información necesaria para el estudio, se registraron densidades bajas y medias. Se emplearon drones (Phantom 2) con video cámaras adaptadas para obtener información relevante como los flujos peatonales, las velocidades de circulación, las líneas de desplazamiento, la formación de grupos y las actividades públicas realizadas. Posteriormente, para el análisis de esta información se empleó la estadística descriptiva, las pruebas de bondad de ajuste (Kolgomorov Smirnov y Chi cuadrado) y las pruebas de hipótesis (“t student y randomization test”) con un nivel de confianza del 95%.

Para modelar el comportamiento peatonal se empleó el “software” de micro simulación VISWALK 8 que se basa en el modelo de la fuerza social; además, los procesos de calibración y validación se llevaron a cabo con 30 corridas del modelo y se modificaron los valores de las velocidades deseadas y los parámetros de comportamiento peatonal. Finalmente, para verificar estadísticamente que el modelo se encuentra calibrado y validado, se empleó la prueba no paramétrica del “randomization test” con diez mil permutaciones y un nivel de confianza del 95%.

4. RESULTADOS

Los resultados del estudio se dividen en dos partes: los que provienen de la observación empírica y los de la simulación con VISWALK 8.

4.1 Observación empírica

4.1.1 Flujos peatonales

El periodo analizado el día jueves, es parte del denominado jueves cultural. En él, sólo se producen actividades sociales y ninguna clase es programada en la universidad, por lo que la vía cumple una función especial al servir no sólo como corredor de desplazamiento, sino también como lugar de encuentro y paseo. Se registraron 2357 peatones considerando ambos sentidos, el 46% eran mujeres y el 54% hombres. La Figura 1 muestra la variación de los flujos peatonales por sentido y por periodo de 10 minutos.

Además, a partir de los flujos encontrados se pudo observar que las densidades en la zona de 4.5 m de ancho fueron menores a 0.3 p/m^2 y en las zonas de 3 m de ancho alrededor de los 0.3 p/m^2 , lo que de acuerdo al Transportation Research Board -TRB (2000) - reflejan niveles de servicio A y B y densidades bajas y medias respectivamente. También, el 92% del flujo peatonal recorre la vía peatonal sin tomar alguno de los caminos que conducen al restaurante, la iglesia o la tesorería.

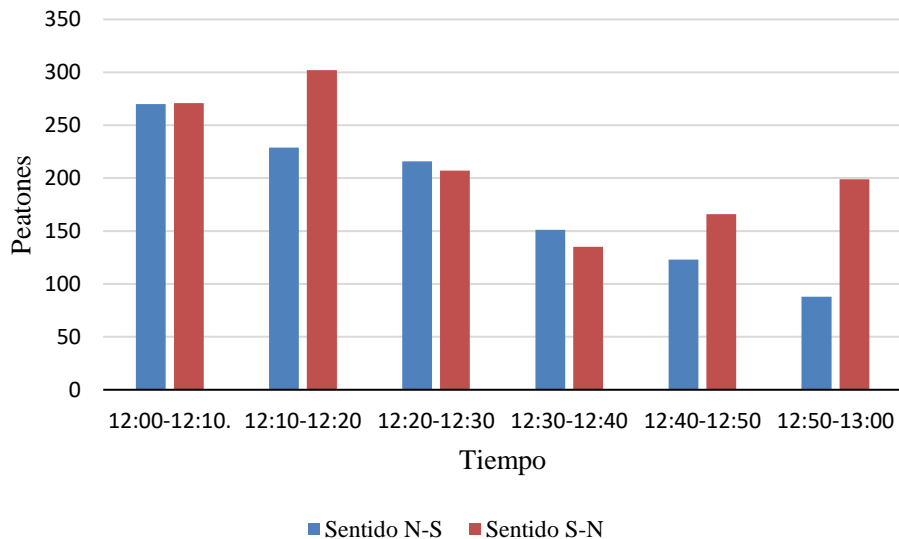


Figura 1. Flujos peatonales en ambos sentidos de la vía

4.1.2 Velocidades de desplazamiento

El análisis de las velocidades de desplazamiento se realiza para la totalidad de peatones, así como para los que se desplazan solos o integran grupos. Debe resaltarse que el 97% de los peatones registrados son jóvenes entre 17 y 25 años y el 3% restante son adultos con buenas condiciones físicas y cognitivas. La velocidad media total fue de 1.14 m/s con una desviación estándar de 0.27 m/s y un rango de velocidades entre 0.51 m/s y 1.8 m/s (Figura 2).

Al realizarse las pruebas de normalidad (Kolgomorov Smirnov) se obtuvo un $p_{\text{value}} > 0.15$, con lo cual se considera que los datos siguen dicha distribución normal. Además, aunque la forma de la distribución y el rango de valores coincide con la encontrada en otros estudios (Weidmann, 1993), la velocidad media y los valores máximos y mínimos difieren considerablemente, por ejemplo, Buchmueller y Weidmann (2006) registraron una velocidad media de 1.34 m/s y una desviación estándar de 0.37 m/s, mientras que otro estudio registró una velocidad media de 1.24 m/s y una desviación estándar de 0.15 m/s (Seyfried et al., 2006). Esta diferencia se debería al motivo de viaje o uso de la vía, ya que ésta es empleada, en el momento del estudio, como lugar de encuentro y paseo.

Cuando se analizan las velocidades de los peatones que se desplazan solos (Figura 3 y Tabla 1), se obtiene una velocidad media de 1.28 m/s para los varones y 1.24 m/s para las mujeres, con desviaciones estándar de 0.225 m/s y 0.23m/s respectivamente. Al realizar las pruebas de normalidad (Kolgomorov Smirnov), para cada grupo de velocidades, se obtuvo un p_{value} de 0.053 para los hombres y un $p_{\text{value}} > 0.15$ para las mujeres, lo que indica que ambos grupos de datos se podrían representar adecuadamente a través de la distribución normal.

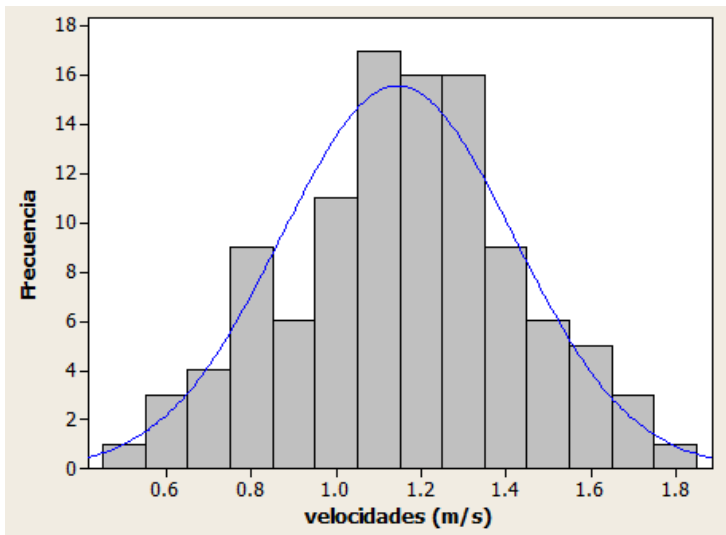


Figura 2. Histograma de velocidades de todos los peatones

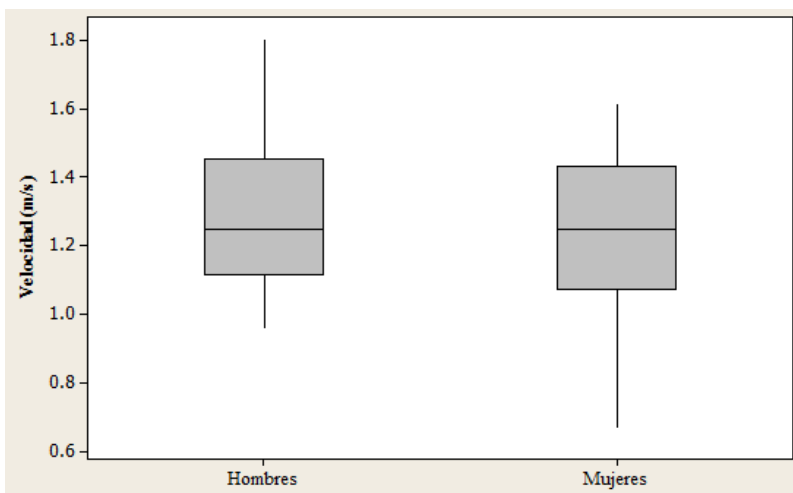


Figura 3. Gráfica de velocidades de peatones solos

Tabla 1. Resumen de velocidades medias

| Descripción | Velocidad media (m/s) | Desviación estándar (m/s) |
|-------------------------|-----------------------|---------------------------|
| Todos los peatones | 1.14 | 0.27 |
| Hombre solo | 1.28 | 0.22 |
| Mujer sola | 1.24 | 0.23 |
| Grupo con 2 integrantes | 1.15 | 0.13 |
| Grupo con 3 integrantes | 0.98 | 0.21 |
| Grupo con 4 integrantes | 0.81 | 0.09 |
| Grupo con 5 integrantes | 0.79 | 0.09 |
| Grupo con 6 integrantes | 0.56 | 0.04 |

También, se compararon las velocidades de los hombres y mujeres mediante una prueba de hipótesis (“t student”) y se obtuvo un p_{value} de 0.49, lo que indica que no habría evidencia de que las velocidades de los hombres sean diferentes a la de las mujeres. Esto difiere de otros resultados obtenidos donde se indica que la velocidad de los hombres es entre el 5% y 7% mayor a la de las mujeres (Gates et al., 2006; Tarawneh, 2001).

Cuando se analizaron los grupos de peatones (Figura 4), se observó que a medida que aumenta el número de integrantes, la velocidad disminuye y se produce una relación lineal entre sus velocidades medias, lo que concuerda con estudios previos (Costa, 2010; Schultz et al., 2010; Moussaid et al., 2010). La Ecuación 2 muestra la relación entre la velocidad (V) y el número de integrantes (N); el coeficiente R^2 obtenido fue de 0.64.

$$V = -0.1415 \cdot N + 1.427 \quad (2)$$

Además, estas velocidades medias encontradas son hasta un 33 % menores a las obtenidas en otras universidades europeas (Federici et al., 2014). Finalmente, los grupos observados tuvieron desde 2 hasta 6 integrantes.

4.1.3 Formación de grupos

El 65% de los peatones camina en grupo mientras que el 35% lo hace solo. Esto coincide con los porcentajes encontrados en otros ambientes universitarios europeos (Federici et al., 2014) y lugares públicos (Moussaid et al., 2010). Además, como se muestra en la Figura 5, la proporción del tamaño de los grupos sigue una distribución de Poisson truncada ($p_{\text{value}} > 0.05$, basado en la prueba Chi cuadrado), lo que concuerda con otros hallazgos (Coleman y James, 1961).

La expresión de la distribución truncada de Poisson, con $\gamma = 1.7$, que permite calcular la proporción (P) es la siguiente (Ecuación 3):

$$P = e^{-\gamma} \cdot \frac{\gamma^n}{n! \cdot (1 - e^{-\gamma})} \quad (3)$$

Cuando se investigó la organización espacial de los grupos de peatones, se observaron patrones que dependían de la densidad. Cuando ésta era baja, los peatones caminaban juntos formando una línea perpendicular a la dirección de movimiento, mientras que cuando era media, la línea se convertía en una V o en una U, similar a lo observado en otros estudios (Moussaid et al., 2010). Este patrón permitiría mantener la comunicación y la cohesión espacial entre los miembros (Costa, 2010). Sin embargo, en la zona de 3 m de ancho se produjo un patrón diferente, pero basado en la combinación de los patrones primarios antes mencionados. La Figura 6 ilustra los patrones encontrados para densidades medias cuando el ancho de vía es de 3 m y 4.5 m.

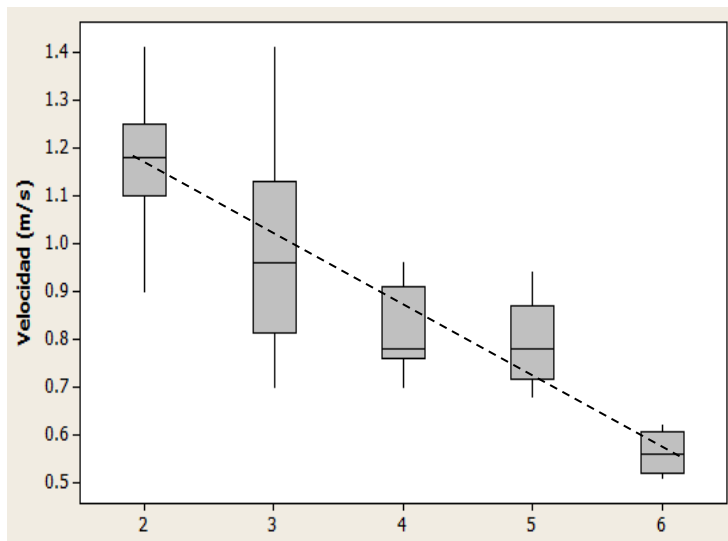


Figura 4. Efecto del tamaño del grupo en la velocidad de los peatones

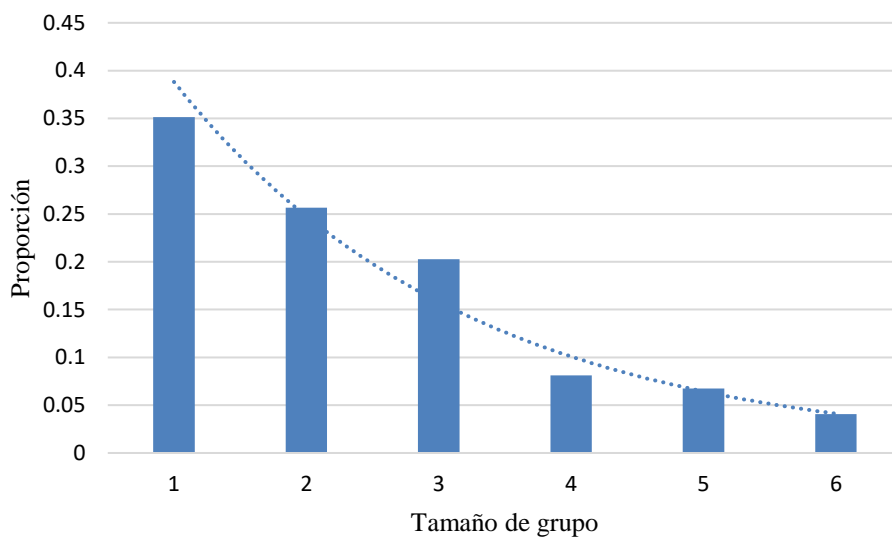


Figura 5. Distribución de los tamaños de grupos observados

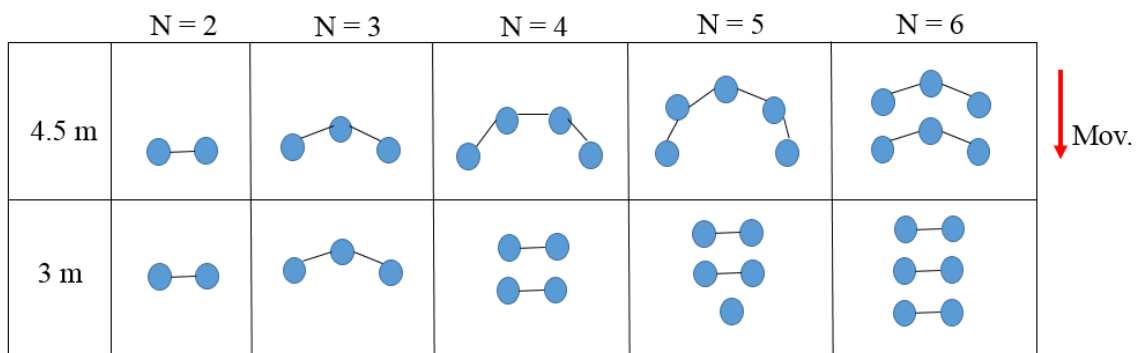


Figura 6. Patrones típicos de organización espacial encontrados

En estudios anteriores se ha determinado que la separación media entre peatones que se desplazan en grupo, para situaciones de densidad media, es 80 cm (Moussaid et al., 2010).

4.1.4 Actividades y zonas en la vía peatonal

Se pudo observar que el espacio de la vía era utilizado por personas que se paraban frente a dos puestos de información, lo que redujo el ancho efectivo de la misma. Además, se generaba un espacio sin utilizar en la zona adyacente a dichos puestos (de longitud media 3.79 m y desviación estándar 1.12 m a cada lado). También, se encontraron sendas de desplazamiento según el sentido de circulación que coincidía con el utilizado en el manejo de los automóviles. Asimismo, de manera esporádica, se formaban obstáculos temporales (personas conversando) en la zona central de la vía, lo que originaba dos senderos perfectamente definidos, en concordancia con la predicción de Helbing y Molnar (1995) y las zonas típicas de Ciolek (1978). En la Figura 7 se puede apreciar la distribución de las zonas y actividades mencionadas.

4.2 Micro simulación con VISWALK

VISWALK 8 es un simulador de comportamiento peatonal que se basa en el principio de la fuerza social. Los parámetros que utiliza se pueden dividir en dos grupos: los parámetros por tipo de peatón y los parámetros globales. De ellos, el primer grupo es el que afecta directamente a la fuerza resultante que actúa sobre un peatón. Entre los parámetros más importantes tenemos a τ (relaxation time) que gobierna la fuerza de dirección; los parámetros λ_{mean} , $A_{soc_isotropic}$, $B_{soc_isotropic}$, A_{soc_mean} y B_{soc_mean} , que determinan la fuerza entre cada par de peatones; el parámetro VD , que determina el impacto entre dos peatones según su velocidad relativa; y “noise”, que es una fuerza aleatoria. En este estudio se realizará la calibración y validación del modelo a través de la manipulación manual de las velocidades deseadas y de los parámetros antes mencionados. En la Tabla 2, se muestran los valores por defecto y los que se consideraron finalmente.



Figura 7. Vía peatonal analizada

Tabla 2. Parámetros empleados en VISWALK

| Parámetro | Símbolo | Valor por defecto | Valor adoptado |
|---|-------------------|-------------------|----------------|
| “Relaxation time” (tiempo de reacción) | τ (tau) | 0.4 | 0.4 |
| Factor de Anisotropía | λ (landa) | 0.176 | 0.5 |
| Fortaleza de la fuerza entre peatones | A_soc_isotropic | 2.7 | 2.4 |
| | A_soc_mean | 0.4 | 0.3 |
| Rango de la fuerza entre peatones | B_soc_isotropic | 0.2 | 0.5 |
| | B_soc_mean | 2.8 | 2.5 |
| Impacto de la velocidad relativa entre peatones | VD | 3 | 3 |
| “Noise” (factor aleatorio) | noise | 1.2 | 1.2 |
| Cantidad de peatones influyentes | react_to_n | 8 | 8 |

Tabla 3. Calibración y validación del modelo

| Etapa | Medición [V(km/h)], [σ (km/h)] | VISWALK [V(km/h)], [σ (km/h)] | P _{value} |
|-------------|---|--|--------------------|
| Calibración | [3.65], [0.7] | [3.53], [0.1] | 0.36 |
| Validación | [4.02], [0.2] | [4.3], [0.08] | 0.14 |

En VISWALK 8 existe la posibilidad de determinar diferentes clases y tipos de peatones. En este caso, se empleó una clase de peatones conformada por dos tipos: hombres y mujeres. Asimismo, de acuerdo con las velocidades observadas se decidió emplear la distribución de velocidades de Fruin 2 para ambos tipos (ya incluida en VISWALK).

Para la calibración y validación del modelo se emplearon velocidades de viaje como parámetro principal y la prueba no paramétrica del “randomization test” con 10000 permutaciones. Los resultados se muestran en la Tabla 3.

4.2 Observaciones sobre el modelo elaborado en VISWALK

Los resultados del análisis indican que el modelo se encuentra calibrado y validado a través de un valor promedio que representa condiciones agregadas, pero el simulador no consideraría en forma directa a los grupos peatonales ni al número de sus integrantes, tema que ha sido resaltado anteriormente por algunos autores (Hoogendoorn y Daamen, 2007).

El estudio empírico indica que la mayoría de los estudiantes se desplaza en grupos y que algunas veces se detienen a conversar en el centro de la vía o donde los caminos se juntan. En la Figura 8, se puede comparar un instante de la simulación con una fotografía de la vía, donde se observan 3 estudiantes caminando solos y el resto en grupo. En VISWALK, los peatones ingresan a la red de forma individual y luego se pueden acercar a otros peatones dependiendo de la magnitud de las fuerzas de repulsión y dirección; pero, al menos de forma directa, no es posible indicar la cantidad de grupos ni sus integrantes, que es lo que determina

la organización espacial dentro de los grupos. También, sólo es posible colocar obstáculos fijos y no temporales. A pesar de esto, VISWALK representaría adecuadamente los senderos de movimiento y las zonas alrededor de los puestos de información que no fueron utilizados por los peatones.

Asimismo, en el estudio se detectó la presencia de una sola persona en silla de ruedas, pero bajo el concepto de la movilidad, los modelos deben incluir a las personas sin autonomía para fomentar la equidad, la justicia social y un diseño universal del espacio público. Afortunadamente, debido a la flexibilidad de VISWALK, fue posible incluir a dicho usuario. En términos generales, VISWALK permitiría modelar a ciudadanos sin autonomía como niños, madres gestantes, ancianos, etc., considerando su tipo particular de comportamiento, lo que se considera como una de sus grandes fortalezas. En la Figura 9, se ilustra la representación adecuada del espacio sin utilizar en la vía (adyacente al puesto de información) y la representación de una persona en silla de ruedas en VISWALK.

Representar adecuadamente las características individuales permitiría diseñar adecuadamente el espacio público y más aún incorporar componentes sociales y psicológicas que incentiven la vida pública y permitan desarrollar la movilidad sostenible y la conexión entre barrios.

4.3 Recolección de datos con el dron

La información con la que se desarrolló este proyecto fue recolectada mediante el uso de un dron (Phanton 2), que llevó una cámara liviana para grabar videos. El dron se ubicó a una altura de entre 16 m y 20 m, y se mantuvo fijo durante la grabación del periodo de estudio. Pero, debido a la duración de las baterías tuvo que subir y bajar cada 10 minutos, lo que condujo a realizar conteos manuales para no perder información relevante. Debido a las corrientes de aire moderadas, el dron se mantuvo parcialmente estable gracias a un dispositivo GPS de estabilización; sin embargo, en el video se puede apreciar cierta inestabilidad que afortunadamente no afectó la investigación al no producirse el “interlacing”, es decir, el problema suscitado cuando el sujeto de estudio se mueve muy rápido a través de la imagen. Otro punto a resaltar es que se debe invertir una cantidad importante de horas para procesar los videos y obtener la información.

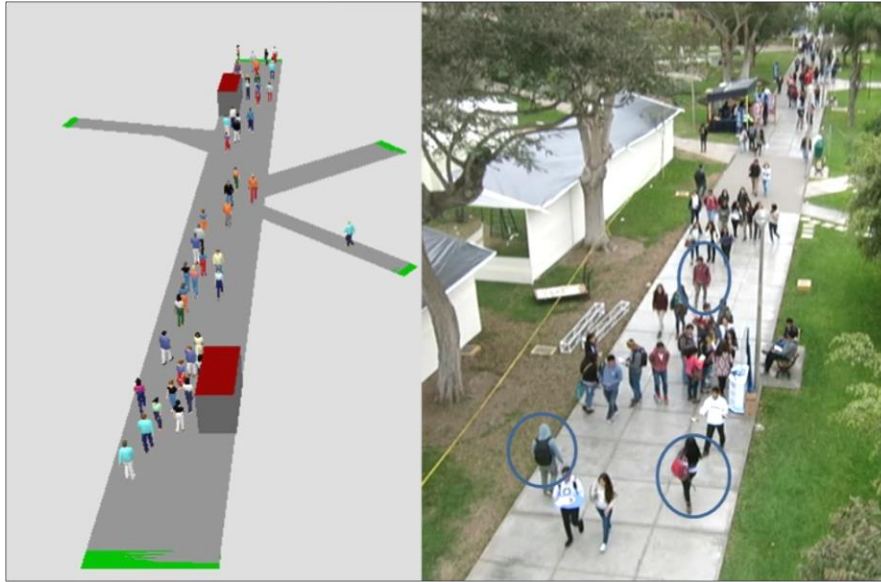


Figura 8. Ejemplos de la animación con VISWALK y del comportamiento en la vía

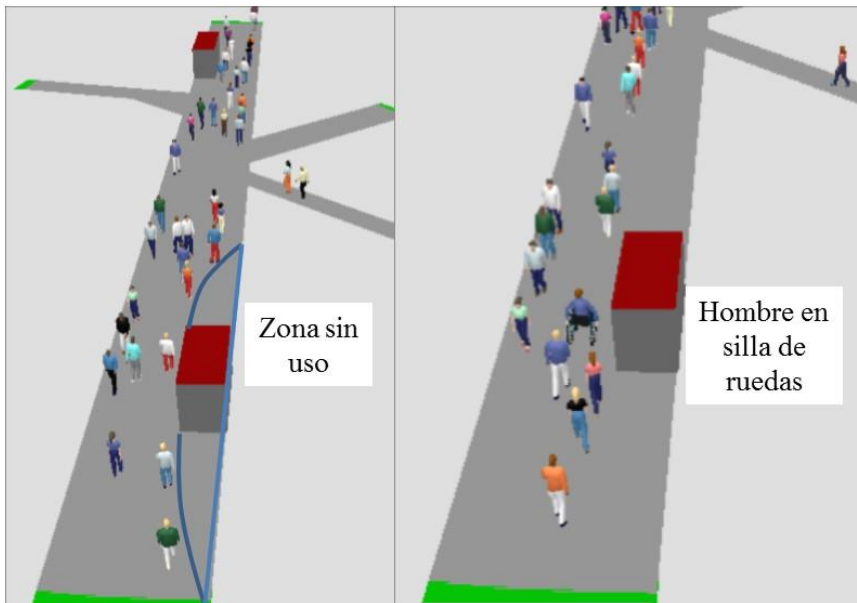


Figura 9. Adecuada representación con VISWALK



Figura 10. Dron empleado para recolectar los datos de la investigación

5. CONCLUSIONES

Los resultados del estudio indican que el 65% de los peatones se desplaza en grupo y que las velocidades medias de los hombres y mujeres serían similares (1.24 m/s). Además, a medida que aumenta el número de integrantes en los grupos, la velocidad media disminuye y se observa una relación lineal entre ellas. También, la proporción del tamaño de los grupos seguiría una distribución de Poisson truncada y se detectan patrones típicos de organización espacial que dependen de la densidad. Cuando la densidad es baja los estudiantes caminan formando una línea perpendicular a la dirección de movimiento, pero cuando la densidad aumenta, principalmente en la zona de 3 m de ancho, se forman patrones particulares: en línea, V, U y una combinación de ellos.

Además, el modelo en VISWALK representaría adecuadamente las condiciones agregadas y a los ciudadanos sin autonomía, pero el simulador no consideraría en forma directa a los grupos peatonales ni al número de sus integrantes. Asimismo, sólo es posible colocar obstáculos fijos y no temporales (como personas que conversan en grupo y luego continúan su movimiento). La representación adecuada de los patrones de organización espacial dentro de los grupos resultaría fundamental para diseñar apropiadamente el espacio público y contribuir, de esta manera, con la movilidad sostenible, segura e inclusiva. Finalmente, serían considerables las ventajas de usar un dron para recolectar información, pero su principal debilidad es la corta duración de las baterías (10 minutos) y su inestabilidad ante las fuertes corrientes de aire.

REFERENCIAS

- BALL, P. (2004). *Critical mass: how one thing leads to another*. New York, NY: Farrar, Strauss and Giroux.
- BLUE, V.J. Y ADLER, J.L. (2001). *Cellular automata micro-simulation for modelling bidirectional pedestrian walkways*. *Transportation Research B*, 37, pp. 837-855.
- BUCHMUELLER, S. Y WEIDMANN, U. (2006). *Parameters of pedestrians, pedestrian traffic and walking facilities*. ETH Zurich, lvt Report No. 132.
- CIOLEK, M.T. (1978). *Spatial behavior in pedestrian areas*. *Ekistics*, 268, pp. 120-122.
- COLEMAN, J.S. y JAMES, J. (1961). *The equilibrium size distribution of freely-forming groups*. *Sociometry* 24, pp. 36-45.
- COSTA, M. (2010). *Interpersonal distances in group walking*. *Nonverbal behavior*, 34 (1), pp. 15-26.
- FEDERICE, L.; GORRINI, A.; MANENTI, L. Y VIZARRI, G. (2014). *An innovative scenario for pedestrian data collection: the observation of an admission test at the university of Milano-Bicocca*. *Pedestrian and Evacuation Dynamics 2012*, Springer, vol. 1, pp. 143-150.
- FITZPATRICK, K.; BREWER, M.A. Y TURNER, S. (2006). *Another look at pedestrian walking speed*. *Transportation Research Board*, No. 1982, pp. 21-29.

- FRUIN, J.J. (1971). *Designing for pedestrians: a level of service concept*. Highway research record 355, pp. 1-15.
- GATES, T.J.; NOYCE, D.A.; BILL, A.R. Y EE, N.V. (2006). *Recommended walking speed for timing of pedestrian clearance intervals based on characteristics of the pedestrian population*. Transportation Research Board, No. 1982, pp. 38-47.
- GEHL, J. (2010). *Cities for People*. Island Press. Washington D.C.
- GIPPS, P.G. y MARKSJO, B. (1985). *A micro-simulation model for pedestrian flows*. Mathematics and Computers in Simulation, vol. 27, No. 3, pp. 95-105.
- HELBING, D. (1991). *A mathematical model for the behavior of pedestrians*. Behav. Sci. 36, pp. 298-310.
- HELBING, D.; BUZNA, L.; JOHANSSON, A. Y WERNER, T. (2005). *Self-organized pedestrian crowd dynamics: experiments, simulations, and design solutions*. Transportation Science 39, pp. 1-24.
- HELBING, D. Y MOLNAR, P. (1995). *Social force model for pedestrian dynamics*. Physical Review E, 51, pp. 4282-4286.
- HENDERSON, L.F. (1974). *On the fluid mechanic of human crowd motions*. Transportation Research 8, pp. 509-515.
- HOOGENDOORN, S.P.; BOVY, P.H. Y DAAMEN, W. (2001). *Microscopic pedestrian wayfinding and dynamics modelling*. Pedestrian and Evacuation Dynamics 1999, Springer, pp. 123-154.
- HOOGENDOORN, S.P. Y DAAMEN, W. (2007). *Free speed distribution – based on empirical data in different traffic conditions*. Pedestrian and Evacuation Dynamics, Springer-verlag, Berlin.
- LEWIN, K. (1951). *Field theory in social science*. Harper y Brothers. New York.
- MOUSSAID, M.; HELBING, D.; GARNIER, S.; JOHANSSON, A. Y COMBE, M. (2009). *Experimental study of the behavioural mechanisms underlying self-organization in human crowds*. Proceeding of the Royal society B: Biological Sciences 276, pp. 2755-2762.
- MOUSSAID, M.; PEROZO, N.; GARNIER, S.; HELBING, D. Y THERAULAZ, G. (2010). *The walking behaviour of pedestrian social groups and its impact on crowd dynamics*. PLoS ONE, vol. 5, issue 4: e10047.
- OKASAKI, S. (1979). *A study of pedestrian movement in architectural space, part 1: pedestrian movement by the application of magnetic models*. Trans. Of A.I.J., No 283, pp. 111-119.
- SCHADSCHNEIDER, A.; KLINGSCH, W.; KLUPFEL, H.; KRETZ, T.; ROGSCH, C. Y SEYFRIED, A. (2008). *Evacuation dynamics: empirical results, modelling and applications*. Encyclopedia of Complexity and System Science.
- SCHULTZ, M.; SCHULTZ, C. Y FRICKE, H. (2010). *Passenger dynamics at airport terminal environment*. Pedestrian and Evacuation Dynamics 2008, Springer, Part 2, pp. 381-396.
- SEYFRIED, A.; STEFFEN, B. Y LIPPERT, T. (2006). *Basics of modelling the pedestrian flow*. Physica A, 368, pp. 232-238.
- SUMPTER, D. (2006). *The principles of collective animal behaviour*. Philosophical

Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences 361, pp. 5-22.

TARAWNEH, M.S. (2001). *Evaluation of pedestrian speed in Jordan with investigation of some contributing factors*. Safety Research, vol. 32, No. 2, pp. 229-236.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, TRB (2000). *Highway Capacity Manual 2000*. National Research Council. Washington D.C.

WEIDMANN, U. (1993). *Transporttechnik der fußgänger*, pp. 87-88 (Schriftenreihe des instituts für verkehrsplanung, transporttechnik, straßen-und eisenbahnbau No. 90, ETH Zurich).

YU, W. Y JOHANSSON, A. (2007). *Modeling crowd turbulence by many particle simulation*. Physical Review E, 76: 046109.



39 Simulación microscópica de flujos vehiculares en una vía rápida para una zona urbana

Daphne Espejel García

Gilberto Wenglas Lara

Vanessa Verónica Espejel García

Alejandro Villalobos Aragón

Universidad Autónoma de Chihuahua, México

José Alejandro Saniger Alba

Universidad Nacional Autónoma de México y PTV Group, México

RESUMEN

Dado el creciente problema de tráfico vehicular al que se enfrenta la mayoría de las zonas urbanas tanto en México como en cualquier otra parte del mundo, es necesaria la simulación microscópica de las vías principales, en especial las que presentan congestionamientos. La microsimulación permite determinar las razones de embotellamientos, los momentos de saturación y las posibles soluciones para reducir tiempos de espera. Este trabajo describe el comportamiento vehicular en la zona norte de la vía rápida más importante de la ciudad de Chihuahua en México (Periférico de la Juventud), que presenta accidentes viales o congestionamientos a distintas horas del día debidos al crecimiento tanto comercial como habitacional de la ciudad y específicamente, de la zona que atraviesa dicha vialidad. Los resultados de la microsimulación señalan que aun con congestionamientos en horas pico, la vialidad en promedio no alcanza la saturación y sus tiempos de demora son menores de 1 minuto. Pero en un escenario a futuro, cuando el parque vehicular aumente en un 50% aproximadamente, la saturación se presentará a cualquier hora del día con tiempos de demora de 13 min aproximadamente. Lo que requerirá trabajar con distintas soluciones para crear recomendaciones y así poder reducir los problemas de congestionamiento vehicular.

Palabras clave: Microsimulación, tráfico vehicular, congestionamiento vehicular, Chihuahua.

1. INTRODUCCIÓN.

El crecimiento en el número de vehículos automotor en las ciudades varía de acuerdo a su posición geográfica, disposición de estacionamientos, y principalmente al ingreso salarial (Bento et al., 2005; Guerra, 2015; Zegras, 2010; Zhang, 2004). A diferencia de ciudades importantes a nivel global, como Zurich, Nueva York o Copenhage, donde a pesar de contar con altos ingresos se promueve el uso de bicicletas o transporte público, por falta de espacio (Gossling, 2013), en México, la cantidad de vehículos continúa creciendo en la mayoría de

sus ciudades, por ejemplo, en la Ciudad de México el parque vehicular ha crecido más rápido que la misma población (Guerra, 2015), (Lozano et al., 2003). Debido a que el aumento de vehículos puede rebasar la capacidad de las principales arterias, el número de accidentes viales, demoras, congestión vehicular y problemas ambientales como consecuencia, aumentan (Thomson y Bull, 2002). Los embotellamientos se presentan de manera frecuente, desde pequeñas congestiones que se pueden resolver en cuestión de minutos, hasta la inmovilización vehicular extrema que puede durar días (Guo et al., 2011).

La problemática que presenta la ciudad de Chihuahua al norte de México, es que sus avenidas principales superan su capacidad a ciertas horas del día. En el censo de 2010 dicha ciudad contaba con 819,543 habitantes (INEGI, 2010), hoy con datos de Recaudación de Rentas de la Secretaría de Hacienda del Estado, la ciudad de Chihuahua cuenta con más de 518,000 vehículos circulando diariamente, lo que ocasiona que más del 70% de las principales vialidades presenten problemas de congestionamiento vehicular.

El transporte y su impacto ambiental, así como la movilidad representan partes importantes de la economía urbana y la calidad de vida (Fedra, 2000). El sistema de representación matemática del flujo vehicular, es decir, la simulación del tráfico se considera como un instrumento indispensable para la planeación del transporte y el sentido de las vialidades de una ciudad (Fellendorf y Vortich, 2010).

El propósito de este proyecto es analizar, por medio de una microsimulación, la capacidad de la vía rápida más importante de la ciudad de Chihuahua, que es el Periférico de la Juventud. Dicha vialidad es la responsable de atender el crecimiento tanto comercial como habitacional, de la zona que atraviesa, por lo que se espera que el flujo vehicular probablemente se incremente en los próximos años. Los resultados advertirán a las autoridades que debe limitarse el crecimiento del tráfico para evitar que en el futuro colapsen las vialidades.

1.1 Microsimulación de tráfico

Dentro de los distintos programas computacionales de microsimulación de tráfico que existen, los cuales ayudan a los ingenieros a proporcionar modelos y escenarios del flujo vehicular (Choa et al., 2004), se eligió trabajar con VISSIM (Verkehr In Städten – SIMulationsmodell, por sus siglas en alemán).

VISSIM es un programa computacional de simulación microscópica basado en el comportamiento del tráfico vehicular, enfocado al análisis y optimización de los flujos vehiculares, que integra condiciones complejas de tráfico para visualizar con un alto nivel de detalle, los modelos de tráfico (Fellendorf y Vortisch, 2010). VISSIM proporciona modelos en términos del comportamiento del conductor, operaciones multi-modales de tránsito, interfaces entre planeación/pronóstico de modelos, y una simulación en 3D (Choa et al., 2004). También puede generar modelos de vehículos de pasajeros y tráileres para

arterias muy congestionadas, modelos de camiones de pasajeros, o cualquier tipo de tren, teniendo como ventaja la creación de modelos de tráfico complejo, que incluye cualquier tipo de transporte más peatones (Moen et al., 2000).

VISSIM trabaja con cuatro modelos distintos de comportamiento vehicular (PTV, 2014):

1) Modelo de seguimiento vehicular; 2) Modelo de cambios de carril; 3) Modelo de comportamiento lateral, y 4) Modelo de reacción a la luz ámbar.

Se utiliza el modelo de seguimiento vehicular, ya que reproduce mejor las condiciones de la vía rápida a estudiar y define el flujo de saturación de dicha vía junto con velocidades deseadas. VISSIM maneja el modelo desarrollado por Wiedemann (1974) que tiene dos versiones: la versión 74 que trabaja con tres parámetros a modificar, aplicada al tráfico urbano y la 99 que se emplea para carreteras y que permite realizar una calibración más fina si se cuenta con suficiente información precisa e instrumentada para hacerlo (Miller, 2009; PTV, 2014). La versión 74 es de tipo psico-físico por basarse en la distancia de seguridad (concepto de desaceleración del conductor cuando se acerca a un vehículo más lento, y que percibe que rebasa su propio umbral de seguridad), lo que incrementa el grado de incertidumbre del conductor por no poder determinar la velocidad exacta del vehículo que le precede (PTV, 2014). En este proyecto se trabajó con la versión 74, puesto que se trata de una vía rápida dentro de la ciudad y por contar con información de los tres parámetros: distancia promedio de separación en detención, tiempo de separación entre dos vehículos y la variación de seguimiento (Lownes y Machemehl 2006a, 2006b).

1.2 Localización del caso de estudio

La ciudad de Chihuahua es considerada como una zona metropolitana por rebasar los límites municipales (se amplía a los municipios de Aquiles Serdán y Aldama), y cubre un área de 259.59 km² (IMPLAN, 2006). La infraestructura vial ocupa aproximadamente el 42% del espacio urbano y las vías principales presentan problemas de flujo vehicular e imagen urbana. En la ciudad se realizan alrededor de 2 millones de viajes diarios (Figura 1), siendo la mayoría efectuados en vehículos particulares (61.3%) (IMPLAN, 2006).

El aumento del uso del automóvil ha originado una gran demanda de espacio para circulación en la ciudad de Chihuahua (IMPLAN, 2009). Por consiguiente, es necesario desarrollar modelos que promuevan un tipo de movilidad sostenible, la cual permite el desplazamiento integral de peatones, conductores, ciclistas, residentes y pasajeros del transporte público, produciendo el mínimo costo energético y contaminación (ambiental y de ruido) posible (Ilárraz, 2006).

La red vial de la ciudad de Chihuahua tiene problemas principalmente por la falta de continuidad dentro de la mancha urbana, de sincronización de los semáforos, de estacionamientos y de sentidos de flujo vehicular (IMPLAN, 2009). La ciudad de Chihuahua cuenta con 12 vialidades principales, de las cuales la más importante y más transitada hoy,

es el Periférico de la Juventud. Se localiza en el extremo oeste de la ciudad y tiene un recorrido de aproximadamente 20 km en sentido N-S (Figura 2).

No cuenta con semaforización y conduce a los nuevos desarrollos habitacionales, además de contar con un corredor comercial a lo largo de todo el camino. Debido a lo anterior, suele ser blanco de congestión en varias horas a lo largo del día (Figura 3).

El gran número de vehículos reduce las velocidades de circulación e incrementa el tiempo de recorrido, lo que genera congestión vehicular. La elaboración de un modelo de microsimulación de flujo vehicular con el programa computacional VISSIM, permite simular el comportamiento de la vía rápida (Periférico de la Juventud), y posteriormente encontrar alternativas para su optimización y reducción de accidentes.

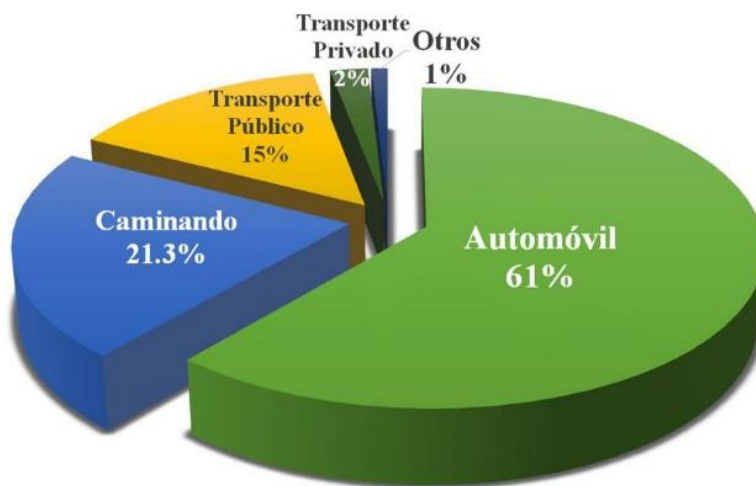


Figura 1. Distribución en porcentaje (%) de los viajes diarios en la ciudad de Chihuahua

Fuente: IMPLAN, 2006



Figura 2. Localización del periférico de la Juventud en la ciudad de Chihuahua, México

Fuente: Google Earth, 2015

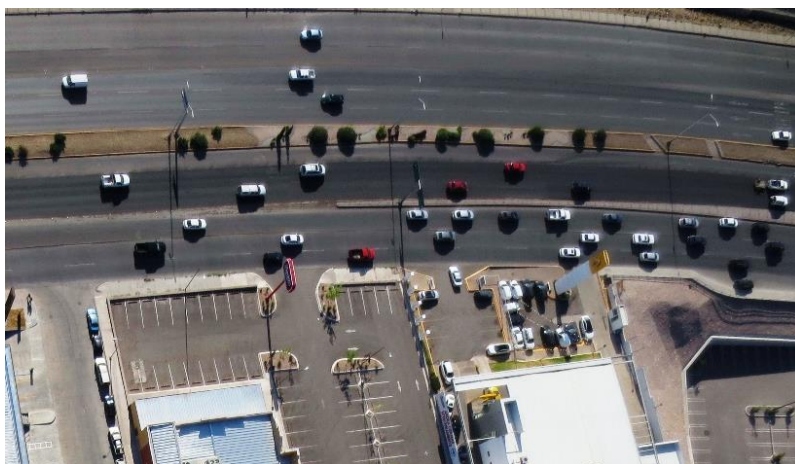


Figura 3. Congestionamiento vehicular en sentido norte-sur, en hora pico por la mañana en el Periférico de la Juventud, Chihuahua, Mex.

Fuente: Imagen tomada con "Drone eBee sense fly"

2. METODOLOGÍA

La simulación microscópica de flujos vehiculares utiliza el modelo de seguimiento vehicular, ya que, en teoría, las velocidades que presentan todos los tipos de vehículos en una vía rápida se consideran constantes (Fellendorf y Vortisch, 2010; PTV, 2014). El modelo utilizado en esta investigación es el modelo propuesto por Wiedemann (1974) que se basa en el comportamiento del conductor por medio de distancias de seguridad y velocidad.

La Ecuación 1 determina las variables que se consideran para el uso del modelo de seguimiento vehicular Wiedemann 74 (Fellendorf y Vortisch, 2010; PTV, 2014; Wiedemann, 1974).

$$d = ax + \left((bx_{addit}) + (bx_{multip}) \cdot (z) \right) \cdot \sqrt{v} \quad (1)$$

Donde “d” es la distancia de seguridad entre vehículos. El término “ax” es la distancia de separación en detención, “bx_{addit}” parte de adición de la distancia de seguridad, “bx_{multip}” parte de la multiplicación de la distancia de seguridad, “z” es un valor de rango que se refiere al comportamiento del conductor y varía de 0 hasta 1 y “v” es la velocidad de flujo libre. El término “ax” se da por la ecuación 2:

$$ax = L_{n-1} + ax_{add} + RND1_n * ax_{multip} \quad (2)$$

En la Ecuación 2, las variables involucradas se refieren a “L_{n-1}” como la longitud del vehículo líder, “ax_{add} y ax_{multip}” son parámetros de calibración y “RND1_n” es la distribución normal aleatoria del número de vehículos.

El modelo Wiedemann 74 de seguimiento de vehículos se aplicó en el “software” VISSIM, el cual permitió realizar la simulación del flujo vehicular en el tramo norte del Periférico de la Juventud. El modelo de simulación microscópica que opera VISSIM, requiere de cuatro áreas, donde las primeras tres se refieren a los insumos y la última es el resultado.

La primera área del modelo desarrollado en VISSIM, fue la red vial, la cual consistió en crear la infraestructura geométrica de la vialidad en estudio. Dicha red se construyó, con base a imágenes satelitales de “Bing Maps” y se verificaron anchos de carril de la vialidad en campo. En la Figura 4 se observa la red del tramo norte del Periférico de la Juventud que mide alrededor de 8.8 km de longitud. Se simuló sólo la parte norte del periférico debido a que es la parte más congestionada y porque la licencia de VISSIM con la que se cuenta sólo opera un área de 10 x 10 km.

La segunda área se refiere a los elementos de control, donde se especifican las reglas de prioridad, de acuerdo al comportamiento de la vía, el control de accesos tanto de entradas como salidas, así como los semáforos. En el caso del tramo del Periférico de la Juventud, al ser una vía rápida, el control semafórico se descarta.

Uno de los insumos de mayor importancia, integrado en la tercera área, es la demanda vehicular y su clasificación. Dicha demanda se obtuvo por el constante aforo vehicular manual que se realizó a diferentes horas del día y distintos días de la semana. El aforo vehicular manual, se eligió por diferentes razones: 1) la instalación de tubos neumáticos en una vía rápida es complicada, debido a que se requiere del cierre parcial de la vía para colocarlos sobre la superficie de rodamiento, provocando congestiones, embotellamientos y

dificultad de instalación por ser superficie de concreto hidráulico en ciertas zonas; 2) manualmente, se puede obtener clasificación, volumen y evaluación del comportamiento de los conductores, usuarios de esta vía.

En el caso de la obtención de velocidades, se emplearon las velocidades de punto, las cuales fueron obtenidas mediante el uso de un radar de control de velocidades para determinar la velocidad de operación de los vehículos. Para obtener las velocidades de recorrido, se utilizó el método de la velocidad promedio, el cual consiste en conducir un vehículo de prueba a una velocidad promedio del flujo vehicular en el tramo analizado (Garber y Hoel, 2005).

La última área, arrojó los indicadores y resultados del modelo de simulación microscópica del tramo norte del Periférico de la Juventud, los cuales se obtuvieron gracias a la realización de diferentes corridas en la simulación con el comportamiento actual del flujo vehicular.

3. RESULTADOS

Como resultados se presenta el volumen de flujo vehicular que circula en el periférico (aforos), junto con la distribución del tipo de vehículos (ligeros o pesados), así como la microsimulación en VISSIM y los distintos escenarios modelados.



Figura 4. Red vial del tramo norte del Periférico de la Juventud

Fuente: VISSIM 7, 2016

3.1 Aforo vehicular

El Periférico de la Juventud tiene una orientación norte-sur, por lo que los aforos se realizaron en ambos sentidos. Se presentan los valores del flujo vehicular (Tabla 1 y 2) de los dos extremos de la red vial de 8.8 km creada, para un día típico de semana que presenta el mayor volumen de flujo. Las horas pico se presentan en la mañana de 7:00 a 9:00 horas y por la tarde de 17:00 a 20:00 horas.

Gracias a que el aforo vehicular fue de tipo visual, se pudo clasificar el tipo de vehículos en ligeros y pesados, y éstos últimos fueron catalogados de acuerdo a su número de ejes. Asimismo, con esta información se puede determinar el tránsito diario promedio (TDP) de cada tipo de vehículo que transita por dicha vía rápida (Figura 5).

3.2 Velocidades

La velocidad máxima actualmente permitida en el Periférico de la Juventud es de 70 km/h, aunque el departamento de vialidad de la ciudad está considerando incrementarla a 80 km/h en los tramos rectos. El rango de velocidades utilizadas en la microsimulación fue de 60 a 80 km/h, ya que son las velocidades en las que generalmente se desplazan los vehículos.

Las velocidades medidas in situ con el radar de control arrojaron resultados que van de 50 hasta 120 km/h, siendo la velocidad promedio de 77 km/h.

Tabla 1. Flujo vehicular de ingreso a la red por la parte sur, medido en (vehículos/hora)

| Hora | Conteo total | 2 ejes | 3 ejes | 4 ejes | 5 ejes | 6 ejes | 9 ejes | Vehículos ligeros | Vehículos pesados |
|---------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|
| 7:00 – 8:00 | 2787 | 61 | 19 | 0 | 4 | 2 | 0 | 2701 | 86 |
| 8:00 – 9:00 | 2892 | 99 | 33 | 1 | 14 | 2 | 0 | 2743 | 149 |
| 17:00 – 18:00 | 2374 | 35 | 10 | 10 | 12 | 11 | 0 | 2296 | 78 |
| 18:00 – 19:00 | 2353 | 44 | 15 | 7 | 7 | 5 | 0 | 2275 | 78 |
| 19:00 – 20:00 | 2143 | 20 | 5 | 6 | 9 | 5 | 0 | 2098 | 45 |

Tabla 2. Flujo vehicular de ingreso a la red por la parte norte, medido en (vehículos/hora)

| Hora | Conteo total | 2 ejes | 3 ejes | 4 ejes | 5 ejes | 6 ejes | 9 ejes | Vehículos ligeros | Vehículos pesados |
|---------------|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|-------------------|
| 7:00 – 8:00 | 3184 | 68 | 26 | 1 | 3 | 3 | 1 | 3082 | 102 |
| 8:00 – 9:00 | 3296 | 69 | 38 | 12 | 7 | 5 | 0 | 3165 | 131 |
| 17:00 – 18:00 | 2933 | 34 | 20 | 5 | 3 | 1 | 0 | 2870 | 63 |
| 18:00 – 19:00 | 2900 | 30 | 13 | 7 | 3 | 1 | 0 | 2846 | 54 |
| 19:00 – 20:00 | 2694 | 13 | 10 | 6 | 4 | 0 | 0 | 2591 | 33 |

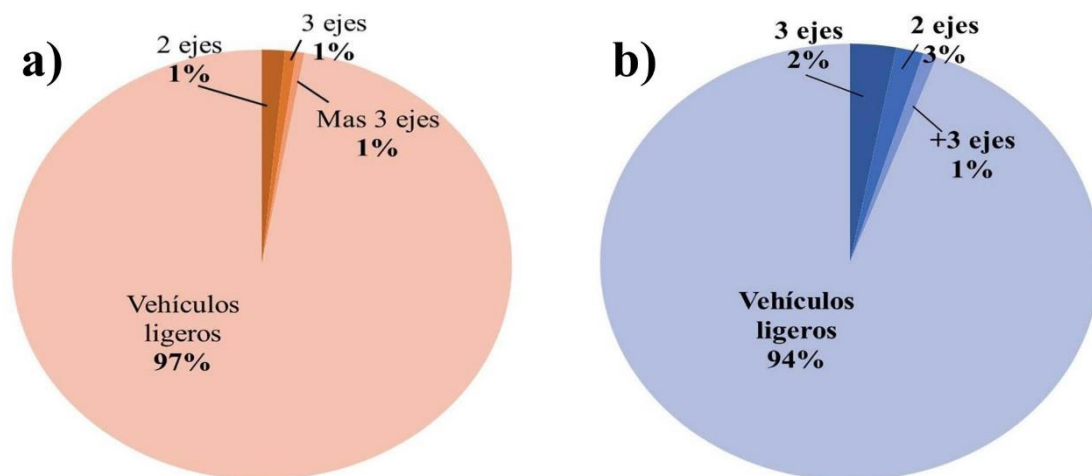


Figura 5. Tránsito diario promedio (TDP) de acuerdo al tipo de vehículo
a) Porcentaje de vehículos en sentido Sur-Norte; b) Porcentaje de vehículos en sentido Norte-Sur en el Periférico de la Juventud, Chihuahua, Mex.

3.3 Simulación microscópica

Una vez creada la red vial con todos los carriles principales y laterales, entradas, salidas y estrechamientos en sus lugares correspondientes, se procedió a suministrar los datos de volumen, clasificación, velocidad y rutas para realizar la microsimulación (Figura 6). Las corridas de la simulación se llevaron a cabo con los valores sugeridos por VISSIM para un primer reconocimiento del comportamiento vehicular: distancia de separación en detención $ax = 2$, parte de adición de la distancia de seguridad $bx_{addit} = 2$, parte de la multiplicación de la distancia de seguridad $bx_{multip} = 3$, y el valor de rango que se refiere al comportamiento del conductor $z = 0.5$.

A continuación, se presentan los datos de la simulación microscópica (Tabla 3) que incluyen tiempos de demora promedio por vehículo, velocidad promedio en la red y demora en detención promedio. Con esta información y los datos medidos de aforos y velocidades, se obtuvo una microsimulación favorable, es decir, con la cantidad de vehículos actuales no se colapsa el flujo vehicular, y el tiempo de demora es bajo (de 1 s con máximo de 5 min). Las congestiones que se presentan se deben principalmente a dos razones: a) la semaforización de las intersecciones, y b) accidentes viales (generalmente por exceso de velocidad).

Simulando diferentes escenarios, en especial ampliando el número de vehículos a 7000, se calcula que el aumento aproximadamente del 50% en la demanda de la red vial evaluada, provocaría la saturación de la vialidad y se generarían tiempos promedio de demora de 91 s, pudiendo llegar hasta 776 s (alrededor de 13 min), lo cual reduciría su velocidad hasta 20 km/h.



Figura 6. Representación parcial de un tramo de la red simulada.

Tabla 3. Desempeño de la red vial analizada después de la microsimulación en un intervalo de una hora

| | Tiempo de demora promedio por vehículo | Rango de demora por vehículo | Velocidad promedio por vehículo | Rango de velocidades por vehículo | Demora en detención promedio |
|--|---|-------------------------------------|--|--|-------------------------------------|
| Valores promedio en un intervalo de 0 a 3600 s | 34.98 s | 0.2 a 339 s | 77.29 km/h | 37 a 86 km/h | 9.99 s |

4. CONCLUSIONES

Los resultados preliminares obtenidos, permiten clasificar al Periférico de la Juventud como una vía rápida, la más importante de la ciudad de Chihuahua, México.

La microsimulación en VISSIM arroja que, con el flujo vehicular actual, y con los valores sugeridos por el “software” para los parámetros del modelo Wiedemann 74, la simulación de la red vial no se colapsa, pero si alcanza saturación en horas pico (7:00 – 9:00 y 18:00 – 20:00 horas), y sus tiempos de demora son de tan sólo 35 s en promedio.

El aumento del volumen vehicular en un 50% provocaría una saturación en la red, lo cual afectaría de manera negativa los tiempos de viaje y el libre flujo sobre el periférico. Este aumento de volumen es inevitable, ya que no se cuenta con un sistema de transporte público óptimo y la ciudad sigue creciendo hacia zonas donde el único acceso es el Periférico de la Juventud.

La obtención de mejores resultados de la simulación y posteriormente, la propuesta de mejoras al Periférico de la Juventud, tales como límites de velocidad, tiempos de semaforización en las laterales y mejor ubicación de entradas/salidas, entre otros, permitirán optimizar el flujo vehicular, evitar largos embotellamientos y reducir accidentes. El siguiente paso de este trabajo es la calibración y validación de los parámetros de VISSIM, para que las condiciones de simulación sean lo más apegadas posible a la realidad y los resultados sean más confiables.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al CONACYT por el recurso económico para la adquisición de la licencia de VISSIM. También a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) por su gestión durante la elaboración de este estudio. Asimismo, a PTV América Latina por su asesoría y permanente apoyo en el manejo de VISSIM.

REFERENCIAS

- BENTO, A.M., CROOPER, M.L., MOBARAK, A.M., Y VINHA, K. (2005). *The effects of urban spatial structure on travel demand in the United States*. Review of Economics and Statistics 87, pp. 466-478.
- CHOA, F., MILAM, R.T. Y STANEK, D. (2004). *CORSIM, PARAMICS, and VISSIM: What the Manuals Never Told You*. En G. BENNET y R. DONNELLY (eds.) Proceedings of the Ninth TRB Conference on the Application of Transportation Planning Methods, 6-10 April, 2004, Transportation Research Board, Baton Rouge, Louisiana.
- FEDRA, K. (2000). *Urban environmental management: monitoring, GIS and modeling*. Computers, Environment and Urban Systems 23, pp. 443-457.
- FELLENDORF, M. Y VORTISCH, P. (2010). *Microscopic traffic flow simulator VISSIM*. En: J. BARCELÓ (ed.) Fundamentals of Traffic Simulation, International Series in Operations Research & Management Science 145, Springer N.Y. pp. 63-93.
- GARBER, N.J. y HOEL, L.A. (2005). *Ingeniería de Tránsito y Carreteras*. Thomson Editores, México.
- GUERRA, E. (2015). *The geography of car ownership in Mexico City: a joint model of households' residential location and car ownership decisions*. Journal of Transport Geography 43, pp. 171-180.
- GOSLING, S., SCOTT, D. Y HALL, M. (2013). *Challenges of tourism in a low-carbon economy*. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change. Volume 4, Issue 6.
- GUO, H., WANG, Z., YU, B., ZHAO, H. Y YUAN, X. (2011). *TripVista: Triple perspective visual trajectory analytics and its application on microscopic traffic data at a road intersection*. En Visualization Symposium (PacificVis), 2011 IEEE Pacific, pp. 163-170.
- ILÁRRAZ, I. (2006). *Movilidad sostenible y equidad de género*. Revista Zerbitzuan 40, pp. 61-66.
- IMPLAN, (2006). *Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población Chihuahua; Chihuahua, Chih.* H. Ayuntamiento de Chihuahua.
- IMPLAN, (2009). *Plan de Desarrollo Urbano del Centro de Población Chihuahua, Tercera actualización; Chihuahua, Chih.* H. Ayuntamiento de Chihuahua.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. (2010). *Censo de población y vivienda México 2010*.
- LOZANO, A., TORRES, V. Y ANTÚN, J.P. (2003). *Tráfico vehicular en zonas urbanas*. Ciencias 70, pp. 34-45.
- LOWNES, N.E. y MACHEMEHL, R.B. (2006a). *Sensitivity of simulated capacity to VISSIM driver behavior parameter modification*. En: Transportation Research Record, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C. The 85th annual meeting of the Transportation Research Board Compendium of Papers.
- LOWNES, N.E. y MACHEMEHL, R.B. (2006b). *VISSIM: a multi-parameter sensitivity analysis*. En: L.F. PERRONE, F.P. WIELAND, J. LIU, B.G. LAWSON, D.M. NICOL Y R.M. FUJIMOTO (eds.) Proceedings of the 2006 Winter Simulation Conference, IEEE, pp. 1406-1413.

- MILLER, D.M. (2009). *Developing a procedure to identify parameters for calibration of a VISSIM model*. Tesis de Maestría en Ciencias, Georgia Institute of Technology.
- MOEN, B., FITTS, J., CARTER, D. Y OUYANG, Y. (2000). *A comparison of the VISSIM model to other widely used traffic simulation and analysis programs*. Institute of transportation engineers.
- PLANUNG TRANSPORT VERKEHR, PTV (2014). *VISSIM 7.0 User Manual*. Karlsruhe, Germany.
- THOMSON, I. Y BULL, A. (2002). *La congestión del tránsito urbano: causas y consecuencias económicas y sociales*. Revista de la CEPAL 76, pp. 109-121.
- WIEDEMANN, R. (1974). *Simulation des Verkehrsflusses (Simulación de Flujos vehiculares)*. Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 8, Universität Karlsruhe, Germany.
- ZEGRAS, C. (2010). *The built environment and motor vehicle ownership and use: evidence from Santiago de Chile*. Urban Studies 47, pp.1793-1817.
- ZHANG, M. (2004). *The role of land use in travel mode choice: evidence from Boston and Hong Kong*. Journal of the American Planning Association 70, pp. 344-360.

40 Evaluación del impacto social de un modelo matemático para la transición entre planes de semaforización. Caso de estudio Paseo General Dávila de la ciudad de Santander, España

Rita Peñabaena Niebles

Víctor Cantillo

Universidad del Norte, Colombia

José Luis Moura

Universidad de Cantabria, España

RESUMEN

Las políticas y estrategias para mejorar la eficiencia de los sistemas de transporte se han convertido en una herramienta para mejorar la movilidad en las ciudades, y reducir los problemas asociados a la congestión, tales como el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demora. Pero a pesar de los esfuerzos realizados, todavía hay trabajo por hacer con el fin de solucionar este problema y sus implicaciones. La óptima implementación de la transición entre los planes de los tiempos de los semáforos es una estrategia para mejorar el desempeño de los sistemas de señales, pero a pesar de su importancia son pocos los estudios que han abordado esta problemática desde un enfoque matemático y haciendo uso de las técnicas actuales de optimización.

El propósito de este artículo es desarrollar y optimizar un modelo matemático integral para mejorar el desempeño de la transición entre los planes de semaforización en las intersecciones coordinadas, usando un enfoque multi objetivo, un caso de estudio es utilizado para evaluar la eficacia del nuevo modelo tomando como base su capacidad para reducir al mínimo, los retardos, las emisiones al aire y el consumo de combustible. Se concluyó que el método propuesto presentó buenas medidas de desempeño tanto para el sistema global, como para la calle principal del sistema, con mejoras en el costo social con respecto al método actual de alrededor del 8% y 7% respectivamente.

Palabras Claves: Consumo de combustible, costo social, demora, emisión de gases; transición.

1. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento en la economía y como consecuencia el aumento del transporte motorizado ha generado problemas de movilidad tanto para vehículos como para peatones,

debido a que las demandas superan las capacidades de la infraestructura, generando así, el fenómeno conocido como congestión que trae consigo problemas tales como el consumo de combustible, las emisiones de gases de efecto invernadero y la demora para los usuarios de los sistemas de transporte, entre otros.

Para los estados de la Unión Europea, se estima que el costo por congestión está en el orden de los \$110 billones de euros al año, con demoras promedios en las vías urbanas de 16.6 segundos por kilómetro y sólo el sector transporte contribuye con el 25% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en Europa, este problema es más grave para países como Irlanda, Reino Unido, Polonia y Hungría.

En el caso de España, aunque los niveles de congestión son más reducidos que en otros países de Europa, las cifras son considerables y la congestión un problema a mejorar. Más del 5% de la red vial sufre retrasos mayores de 12 segundos por km, concentrados principalmente en Madrid y Barcelona y demás ciudades principales. Los conductores y pasajeros en España gastan cerca de 420 millones de horas al año en la congestión, con un costo anual estimado en más de \$5.5 millones de euros por año.

Desde el punto de vista ambiental las cifras también son poco alentadoras, la emisión de gases efecto invernadero a la atmósfera procedentes del sector transporte, aumentó su nivel de concentración a un máximo sin precedentes en el año 2013, creciendo en un 56.8% por encima que lo registrado en 1990 y sobrepasando las cifras fijadas en el protocolo de Kioto. Actualmente la contaminación atmosférica de las ciudades y áreas urbanas proviene del uso del automóvil privado, el cual consume cuatro veces más combustible por pasajero que un autobús. Los automóviles en España son responsables del 62% de las emisiones de CO₂, del 80% de las emisiones de NO_x y del 60% de las emisiones de partículas.

Teniendo en cuenta las cifras anteriores, el sector transporte en España enfrenta un gran desafío para el diseño de un movilidad sostenible que satisfaga las exigencias ambientales, económicas y sociales. Lo que requiere un sistema de transporte robusto que se adapte a las necesidades de la sociedad y el medio ambiente y que garantice el movimiento de las personas de una forma eficiente, económica y segura.

Diferentes corredores pueden requerir diferentes modos de operación basados en sus necesidades y patrones de tráfico relativos (Balke et al., 1998). Existen dos modos de operación en un sistema de señal coordinada: Hora del día (TOD por sus siglas en inglés), que establece el plan de coordinación de eventos de acuerdo a un tiempo determinado del día y Selección de Patrones de Tráfico (TRP por sus siglas en inglés), que recibe los datos de los detectores de tráfico y elige un plan de tiempos adecuado que coincida con las condiciones de tráfico existentes. Además, hay un modo de operación con preferencia a la emergencia y a las vías férreas donde la operación normal es anticipar los tiempos de verde del semáforo para ayudar a formar el transporte con un cierto grado de prioridad. Para cada

uno de estos modos de operación, las programaciones de los semáforos deben pasar a través de una fase de transición cada vez que se modifica un plan de semaforización. La fase de transición se define generalmente como el proceso de cambiar de un plan de tiempos de semáforos a otro y podría incluir cambios en el “offset” o desfase, tiempos de verde (“Split”) o duración del ciclo, o todas ellas a la vez (Cohen et al., 2007), hasta que se logre una vez más la coordinación en el nuevo plan.

Optimizar la fase de transición o el cambio entre los planes de tiempo de la señal tiene un alto impacto en los conductores, pasajeros y el medio ambiente. Los conductores y pasajeros se beneficiarán de la reducción al mínimo del tiempo de viaje, paradas y retrasos. Los efectos positivos sobre el medio ambiente darán lugar a una reducción de las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

A pesar de la relevancia del proceso de transición, muy pocos estudios (Balke et al., 1998; Penabaena-Niebles et al., 2014; Shelby et al., 2006) se han dirigido a optimizar la transición entre planes de semaforización. La mayoría de los esfuerzos de investigación se han centrado en el desarrollo de planes en los repartos de tiempo de la señal a través de mejores métodos de optimización y modelado de tráfico más realista (Park et al., 2004). Muy pocos estudios han abordado la fase de transición mediante el uso de modelos matemáticos (Lee y Williams, 2012; Lieberman y Wicks, 1974; Peñabaena-Niebles et al., 2015; Selekwa et al., 2003), por lo que es importante desarrollar nuevos modelos matemáticos en los que se pueda incorporar las recientes técnicas de modelado y optimización.

Esta investigación presenta una alternativa para mitigar los problemas de la congestión y contribuir, a través del uso de la modelística matemática y optimización, en el desarrollo de sistemas de señales de tráfico semaforizadas flexibles que permitan la gestión mejorada del tráfico en tiempo real y que integren el componente ambiental con el componente social.

El propósito de este artículo es evaluar el desempeño de un modelo matemático integral de la transición entre los planes de semaforización en las intersecciones coordinadas, usando un enfoque multi objetivo en una red de intersecciones semaforizadas en la ciudad de Santander mediante la cual se evaluará la validez y utilidad del modelo propuesto. Esta evaluación se basará, dadas unas condiciones actuales y un escenario propuesto, en la capacidad para reducir al mínimo los retardos o demoras, las emisiones de contaminación del aire y el consumo de combustible y su eficacia para reducir los costos sociales asociados con el período de transición.

2. DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA LA TRANSICIÓN

El modelo matemático para la transición entre los planes de semaforización que se evalúa sigue el diseño propuesto por Peñabaena-Niebles et al., (2014), orientado a minimizar la

demora, el consumo de combustible y las emisiones de gases al aire durante el período de transición.

Se trata de un modelo matemático no lineal donde la transición se representa como un proceso dinámico, orientado a mantener la progresión y está definido con cuatro (4) variables de decisión: el número de pasos de la transición n , el cambio en el desfase u “offset” $(\Delta\varphi)_{ij}$, el cambio de la longitud del ciclo común $(\Delta C)_j^c$ y el tiempo efectivo en verde $(\Delta g)_{ijm}$. El número de pasos de la transición n , es el número de ciclos necesarios para completar la transición. El cambio de desfase $(\Delta\varphi)_{ij}$ es la variación de desfase entre los pasos de transición, donde el desfase se define como el inicio del tiempo en verde en la fase coordinada de una intersección en relación con el inicio del tiempo en verde en una intersección de referencia. El cambio de longitud del ciclo común $(\Delta C)_j^c$ es la variación de la duración del ciclo común entre los pasos de transición, donde la longitud del ciclo es el tiempo necesario para completar una rotación a través de todas las fases y debe ser el mismo para todas las intersecciones para mantener una relación basada en el tiempo coherente con el plan de coordinación (Koonce et al., 2008). El cambio en la fase verde $(\Delta g)_{ijm}$ es la variación en los tiempos de verde en cada fase o movimiento.

Así, el problema de la transición es representado matemáticamente como sigue:

Minimizar SC

$$\begin{aligned} & \sum_j^n \sum_i^I \text{VT.} \sum_m^M \left[\sum_v^V \text{OR}_v \cdot D_{ijmv}(\mathbf{g}_{ijm}, C_{ij}, \mathbf{q}_{ijmv}) \right] \\ & + \sum_j^n \sum_i^I \sum_m^M \left[\sum_v^V \text{OC}_v \cdot \text{FC}_{ijmv}(\mathbf{g}_{ijm}, C_{ij}, \mathbf{q}_{ijmv}) \right] \\ & + \sum_j^n \sum_i^I \sum_e^E \left[\text{ECG}_e \cdot \sum_m^M \sum_v^V \text{GE}_{ijmve}(\mathbf{g}_{ijm}, C_{ij}, \mathbf{q}_{ijmv}) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$C_j^c = C_{j-1}^c + (\Delta C)_j^c \quad \text{para } 1 \leq j \leq n \quad (2)$$

$$C_{ij} = C_j^c + (\Delta\varphi)_{ij} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (3)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{ij-1} + (\Delta\varphi)_{ij} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (4)$$

$$g_{ijm} = g_{ij-1m} + (\Delta g)_{ijm} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n, 1 \leq m \leq M \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^n (\Delta C)_j^c = C_{if} - C_{io} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (6)$$

$$\sum_{j=1}^n (\Delta\varphi)_{ij} = \varphi_{if} - \varphi_{io} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n (\Delta g)_{ijm} = g_{ifm} - g_{iom} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n, 1 \leq m \leq M \quad (8)$$

$$C_{ij-1} \leq C_{ij} \leq C_{if} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (9)$$

$$\varphi_{ij-1} \leq \varphi_{ij} \leq \varphi_{if} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (10)$$

$$g_{ij-1m} \leq g_{ijm} \leq g_{ifm} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (11)$$

$$C_{ij} = \sum_{m=1}^4 (g_{ijm} + y_{ijm} + r_{ijm}) \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n, 1 \leq m \leq M \quad (12)$$

$$g_{ij1} + g_{ij2} = g_{ij5} + g_{ij6} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (13)$$

$$g_{ij3} + g_{ij4} = g_{ij7} + g_{ij8} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (14)$$

$$1 \leq n \leq \frac{Tf}{C_{i0}} \quad \text{para } 1 \leq i \leq I \quad (15)$$

El costo social (SC) es representado como la suma del costo del conductor o usuario y el costo ambiental (Ecuación 1). En esta función, el modelo de demora del Manual Highway Capacity (HCM) ("B. National Research Council. Transportation Research.," 2010), fue seleccionado para estimar la demora promedio por control por vehículo para cada intersección en un corredor o arteria, suponiendo que no hay cola inicial. Los componentes de consumo de combustible y las emisiones de gases incluidos se estiman de acuerdo a los modelos propuestos por Akçelik (1983) y Frey, et al.,(2001). Con el fin de evaluar el impacto de las intersecciones señalizadas sobre el consumo de combustible y las emisiones al aire, los dos componentes se basan en la suposición de tres cantidades independientes que corresponden a tres modos de conducción: espera, aceleración y desaceleración.

Las restricciones que constituyen el espacio de posibles soluciones para el procedimiento de transición siguen la estrategia implementada por Lee y Williams (2012) en la que cada intersección debe ser operada con un tamaño de ciclo común para mantener la coordinación de las señales de un ciclo a otro, así los cambios graduales en los desfases u "offset" se asocian con cambios graduales específicos en la duración de un ciclo común y viceversa. Por otra parte, además de la optimización conjunta de los desfases y la duración del ciclo, la estrategia de transición propuesta suaviza el requisito de una longitud de ciclo común durante el período de transición. También se definen restricciones de precedencia para asegurar que las variaciones totales de las variables de control se encuentren dentro de los niveles de cambio establecidos durante el período de transición. Por último, se contemplan las condiciones de la estructura estándar definida por la asociación nacional de fabricantes eléctricos (NEMA por sus siglas en inglés) para tiempos de señal.

Para resolver el modelo matemático de la transición propuesto, el problema puede ser visualizado y representado en la forma de un problema de Optimización de la Colonia de Hormigas (ACO), donde un algoritmo ACO es diseñado para encontrar los parámetros de transición que minimizan el costo social.

Analizando la formulación anterior se observa que la longitud de ciclo (C_{ij}) puede ser calculado a partir de $(\Delta C)_j^c$ y el cambio en el desfase $(\Delta \varphi)_{ij}$ usando la Ecuación 3. A su vez, el cambio en el tiempo de verde efectivo $(\Delta g)_{ijm}$ puede ser obtenido a partir de la longitud de ciclo (C_{ij}) usando las Ecuaciones 5 y 12-14, pero las variables de decisión n , $(\Delta C)_j^c$ y

$(\Delta\varphi)_{ij}$ deben ser conocidas para encontrar una solución. Esto significa que es necesario obtener un conjunto de valores diferentes para cada una de las variables. Mientras que la variable de decisión n , está restringida por el modelo como un número entero partir de la Ecuación 15, el ciclo común de cambio de longitud $(\Delta C)_j^c$ y cambio en el desfase $(\Delta\varphi)_{ij}$ son dos matrices multidimensionales, por lo tanto, tiene muchas más formas posibles de ser generados.

Sin embargo, para los índices i y j , los valores de $(\Delta C)_j^c$ y $(\Delta\varphi)_{ij}$ están restringidos por la Ecuación 2 y 4, por lo que sólo pueden variar de forma independiente a través del índice j . Para evitar la generación de valores aleatorios para llenar cada una de las j sub-matrices de $(\Delta C)_j^c$ y $(\Delta\varphi)_{ij}$, estos valores se interpolan con una función exponencial, al mismo tiempo, esto permite que las soluciones obtenidas sean analizadas más adecuadamente con el fin de inferir reglas que conducen a una mejor comprensión de ellos.

Considerando lo anterior, las Ecuaciones 2 y 4 se redefinen como sigue:

$$C_j^c = C_{io} + (C_{if} - C_{io}) \left(\frac{j}{n}\right)^{cpow} \quad \text{Para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (16)$$

$$\varphi_{ij} = \varphi_{io} + (\varphi_{if} - \varphi_{io}) \left(\frac{j}{n}\right)^{\varphi pow} \quad \text{Para } 1 \leq i \leq I, 1 \leq j \leq n \quad (17)$$

Los valores de C_{io} y C_{if} se dan como parámetros(son conocidos pues son los valores óptimos para los planes antes y después) en todas las intercepciones $i \in I$, así como todos los valores para φ_{io} y φ_{if} para todas las intercepciones $i \in I$, en consecuencia, las únicas variables desconocidas en las Ecuaciones 16 y 17 serían $cpow$ y φpow , que son exponentes que permiten que la salida de la función varíe de acuerdo con los valores que estos presenten, por lo tanto, una solución puede generarse sólo con tres variables: n , $cpow$ y φpow , que son las tres dimensiones del espacio de solución. Diferentes valores de $cpow$ y φpow generan diferentes interpolaciones para una solución, pero una de las propiedades de las funciones exponenciales es:

$$\forall x \in [0,1] \quad x^a \leq 1 \quad \text{if } a \geq 0 \quad (18)$$

Entonces, si $\varphi pow \geq 0$ $cpow \geq 0$ entonces para, $1 < j < n$ tenemos:

$$(\Delta\varphi)_{i1} \leq (\Delta\varphi)_{ij} \leq (\Delta\varphi)_{in} \quad (19)$$

$$(\Delta C)_{i1} \leq (\Delta C)_j^c \leq (\Delta C)_{in} \quad (20)$$

Además, como la función exponencial es monótona creciente en todo su dominio, las Ecuaciones 2 y 4 siempre se respetan.

Entonces, el espacio de la solución es una estructura tridimensional que contiene todas las tripletes posibles compuestas por: n , $cpow$ y φpow .

Una vez que la colonia de hormigas y el espacio de soluciones son creadas, las hormigas pueden empezar a moverse. Así al principio del algoritmo, hormigas de diferentes tipos son distribuidos al azar, a través del espacio solución. Cada hormiga debe ser inicializada con valores de sus coordenadas en los ejes n , $cpow$ y φpow que se utilizan como parámetros para generar la solución correspondiente a la ubicación en el espacio.

La solución de clase proporciona toda la funcionalidad necesaria para obtener el valor de salida del costo social o función objetivo a ser minimizado. Las hormigas definen este valor, dependiendo de sus tipos AntD, AntF y AntE, respectivamente, para obtener el atractivo de sus puntos vecino en el espacio de la solución.

Cada vez que las hormigas se mueven a través del espacio de soluciones dejan un rastro de feromonas, que se acumula en una matriz de punto flotante en tres dimensiones dentro de la clase Espacio Solución.

El proceso ACO es finalizado cuando el número de las iteraciones definidas se alcanza o hasta que el proceso converge, esto es todas las hormigas eligen el mismo mejor camino.

3. EVALUACIÓN DEL IMPACTO SOCIAL DE LA TRANSICIÓN ENTRE PLANES DE SEMÁFOROS: CASO CORREDOR PASEO GENERAL DÁVILA

La aplicación práctica de esta investigación se centra en el desarrollo de un plan de transición para el cambio en los tiempos de repartos de los semáforos entre dos periodos del día, basado en la metodología propuesta, para un tramo de red semafórica en la ciudad de Santander, España. Para este caso de estudio se identificó una de las redes viales de la ciudad con mayor nivel de tráfico durante las horas picos y cuyo diseño vial imposibilita por el momento mejoras. Así, la aplicación práctica del modelo planteado se realizará en la red semafórica del Paseo General Dávila, comprendida desde la Calle Francisco Palazuelos hasta la Calle Vásquez de Mella, incluyendo dentro del estudio el cruce entre el Paseo General Dávila y la Calle Alonso Vega en el tramo de Bajada Sanjuan, tramo de red que consta de 12 cruces o intersecciones semaforizadas (Figura 1).

Las concentraciones más altas de flujo vehicular para el paseo General Dávila ocurren durante las horas de la mañana o en horas de la tarde, con el movimiento de trabajadores y estudiantes desde sus hogares hacia sus áreas de trabajo, escuelas y/o universidades y viceversa. Teniendo en cuenta lo anterior se definió como período de análisis el comprendido entre las 7:15 hasta las 9:15 de la mañana, donde operan los planes de reparto número 31 y número 51.



Figura 1. Delimitación red caso de estudio: Paseo General Dávila.

Uno de los principales requerimientos al momento de definir un plan de transición es que los planes de reparto para los periodos antes y después respondan a las condiciones de tráfico para el momento de análisis; es por esto que se requiere definir la optimización de los mismos. Así para el caso de estudio, se optimizaron los planes de reparto 31 y 51 suministrados mediante el uso de la herramienta de optimización SYNCHRO en su versión 8.0.

Una vez definidos los tiempos de reparto óptimos para los planes 31 y 51, se procede a evaluar la validez y utilidad del modelo propuesto. Esta evaluación se basará en las condiciones actuales dadas y un escenario propuesto. Para esto se diseñaron varios planes de transición usando diferentes metodologías encontradas en la literatura y en la práctica para este fin. Los planes de transición se hicieron siguiendo los métodos: inmediato, dos ciclos, tres ciclos y el propuesto en esta investigación usando modelación matemática y ACO.

Para cada plan proyectado se construyó un escenario de simulación con el objetivo de obtener los datos relevantes que permitan medir su eficacia, medida en función de su capacidad para reducir al mínimo los retardos o demoras, las emisiones de contaminantes al aire, el consumo de combustible y los costos sociales asociados con el período de transición. Para lo cual se utilizó el “software” de simulación AIMSUN en su versión 8.10, se diseñaron los diferentes planes de control asociados a cada método de transición y se estableció el plan maestro de control encargado de definir la forma como se realizará el proceso de cambio de planes.

Una vez definidos los diferentes planes a utilizar en el estudio, se procedió a diseñar los respectivos escenarios de simulación. Cada escenario se realizó con una duración de 1 hora de simulación, en el periodo comprendido entre las 7:45 a.m. hasta las 8:45 a.m., iniciando siempre con el plan 31 (actual u óptimo), introduciendo la transición a las 8:15 a.m. en cada uno de los casos hasta alcanzar el plan 51 en sus versiones actuales u optimizada según sea

el caso, este último plan se repetirá hasta el fin del periodo de simulación. Cada uno de estos escenarios se trabajó con cinco repeticiones y los datos para el análisis se realizaron basados en los resultados de la media respectiva a cada situación.

4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El objetivo de esta sección es evaluar la eficacia de cada uno de los métodos establecidos anteriormente en términos del costo social asociado al mismo, según la función de costo diseñada para este estudio. Para esto es necesario, a partir de los datos obtenidos en los cinco escenarios de simulación establecidos, obtener el costo social, así como los respectivos costos para el tiempo, costos operativos del vehículo y costo de emisión de gases contaminantes. Estos costos, no son medidas de desempeño directas para el “software” de simulación AIMSUN, pero se pueden obtener a partir de los datos que genera el mismo, tales como: flujo vehicular para cada sección del sistema, discriminados como auto particular, bus y minibús, y medidas de desempeño para cada sección según modelos HCM: tiempo de demora, tiempo de parada y porcentaje de paradas.

Los parámetros para la función de costo social para el caso de estudio se definen de la siguiente forma: el costo de tiempo por persona (VT) es establecido como 10.38 € /hora para vehículos ligeros, bus y minibús y se calcula usando un ingreso promedio por hora de 25.95 € /hora (CEDEX, 2010) y un factor de valor de tiempo como proporción del ingreso promedio por hora de 40%, según la metodología sugerida por Akçelik y Besley (2003). La tasa de ocupación de los vehículos se estableció como 1.3 pasajeros para vehículo particular, 58 pasajeros para los buses y 25 pasajeros para minibús.

El costo de operación por vehículo por combustible es definido como 9.37 € /galón, calculado con un precio de la gasolina de 1.179 €/litro, y un factor de costo de recursos de combustible de 70% y la relación costo/combustible de 3.

Para definir los costos sociales marginales de las emisiones de gases de efecto invernadero se estableció un precio para el dióxido de carbono (CO_2) de 8 €/tC (SENDECO2, 2015), lo anterior debido al desplome en el precio de las cuotas de emisión del mismo en el mercado europeo, aunque otros estudios definen el valor de efecto invernadero del CO_2 para 2015-2030 entre 25€ - 30€.

El peso promedio del monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), y óxido de nitrógeno (NO_x) para cada modo de conducción se calcula a partir de resultados experimentales de Tong et al., (2000) y de Wing-Tat et al., (2005), los cuales se ajustan a los estándares promedio. De igual forma el potencial de calentamiento global (GWP) para el CO, HC y NO_x se calcula de acuerdo con lo establecido por Shine (2001). Estos valores y las tasas de ocupación para cada tipo de vehículo se muestran en la Tabla 1.

Definidos los parámetros del modelo y los datos para cada sección, se procedió a definir las medidas de desempeño para cada escenario y de esta forma, se compararon para medir la eficacia de cada uno de los métodos estudiados. El primer análisis que se realizó tuvo en cuenta todo el sistema en estudio, los resultados se resumen en las Tablas 2 y 3, donde se relacionan las medidas de desempeño en estudio y el % de mejora con respecto al método actual.

Tabla 1. Consumo de combustible y emisiones de gases de acuerdo con el modo de conducción, tipo de vehículo y tasa de ocupación

| | Tipo de vehículo | | | | | | | | |
|--------------------------------|------------------|----------------|--------|-------------|----------------|--------|-------------|----------------|--------|
| | Particular | | | Minibús | | | Bus | | |
| Modos de conducción | Aceleración | Desaceleración | Espera | Aceleración | Desaceleración | Espera | Aceleración | Desaceleración | Espera |
| Combustible (mg/seg) | 62.62 | 28.11 | 18.11 | 133.1 | 117.1 | 25.9 | 133.1 | 117.1 | 25.9 |
| CO (mg/seg) | 9.54 | 9.96 | 2.99 | 12.63 | 10.92 | 7.5 | 12.63 | 10.92 | 7.5 |
| GPW_{CO} | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| HC (mg/seg) | 0.69 | 0.58 | 0.36 | 2.36 | 1.96 | 1.15 | 2.36 | 1.96 | 1.15 |
| GPW_{HC} | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 | 12 |
| Nox (mg/seg) | 0.62 | 0.69 | 0.14 | 13.94 | 11.65 | 4.04 | 13.94 | 11.65 | 4.04 |
| GPW_{NOx} | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 | 40 |
| Tasa de ocupación | 1.3 | | | 25 | | | 58 | | |

Tabla 2. Demora y tiempo total de viaje para el sistema en estudio

| Método | Demora | | Tiempo Total | |
|--------------------------------|---------|--------|--------------|--------|
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 41.92 | — | 32.8 | — |
| Inmediato planes optimizados | 37.60 | 10.31% | 30.8 | 6.11% |
| Dos ciclos planes optimizados | 36.99 | 11.76% | 30.3 | 7.67% |
| Tres ciclos planes optimizados | 37.47 | 10.62% | 31.1 | 5.46% |
| Propuesto (ACO) | 35.56 | 15.17% | 29.1 | 11.35% |

Tabla 3. Resultados costo social para el sistema en estudio

| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
|--------------------------------|--------------|------|------------------|------|------------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 618.81 | – | 528.8 | – | 69.3 | – | 20.7 | – |
| Inmediato planes optimizados | 597.17 | 3.50 | 513.1 | 2.97 | 64.6 | 6.86 | 19.5 | 5.75 |
| Dos ciclos planes optimizados | 587.63 | 5.04 | 507.4 | 4.04 | 61.5 | 11.25 | 18.7 | 9.68 |
| Tres ciclos planes optimizados | 593.67 | 4.06 | 510.2 | 3.51 | 64.2 | 7.46 | 19.3 | 6.72 |
| Propuesto (ACO) | 569.97 | 7.89 | 492.2 | 6.92 | 59.6 | 13.97 | 18.1 | 12.32 |

Como se puede observar en la Tabla 2 el método propuesto presenta mejor desempeño en tiempo de demora promedio y tiempo total de viaje seguido por el método de dos ciclos, el método actual presentó un pobre desempeño en comparación a los otros métodos en estudio.

En lo referente al costo social para el sistema estudiado, el método propuesto presentó el mejor desempeño en lo referente al costo social con un valor de 569.97€/h-simulada, en la Tabla 3 se puede observar que la principal mejora con respecto al método actual se dio para el costo operativo del vehículo (13.97%), seguido por el costo de emisión de gases (12.32%), lo que demuestra un buen desempeño de este método desde el punto de vista del medio ambiente, con buenas mejoras también para los usuarios en términos de demora y costo del tiempo. El segundo método con mejor desempeño fue el de transición en dos ciclos.

Para hacer un análisis más desglosado que permitiera evaluar el desempeño de los métodos en estudio sobre la arteria principal y sobre las calles secundarias, se dividió el sistema en un subsistema que comprendiera todas las intersecciones secundarias o perpendiculares al Paseo General Dávila y otro subsistema que solo evaluara el efecto del costo social en la vía principal de estudio (Paseo General Dávila).

Las Tablas 4 y 5 muestran los resultados obtenidos para Paseo General Dávila incluyendo el porcentaje de mejora de cada método con respecto al procedimiento actual.

Como se puede observar en la Tabla 4 el método propuesto presenta los mejores desempeños en lo referente al tiempo de demora y tiempo total de viaje, seguido por el método de tres ciclos.

Tabla 4. Resultados demora y tiempo total de viaje para calle principal

| Método | Demora | | Tiempo Total | |
|--------------------------------|---------|--------|--------------|--------|
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 28.10 | – | 22.0 | – |
| Inmediato planes optimizados | 25.42 | 9.55% | 20.8 | 5.31% |
| Dos ciclos planes optimizados | 25.09 | 10.70% | 20.6 | 6.56% |
| Tres ciclos planes optimizados | 24.78 | 11.79% | 20.5 | 6.70% |
| Propuesto (ACO) | 23.39 | 16.77% | 19.2 | 13.02% |

Tabla 5. Resultados costo social para calle principal Paseo General Dávila

| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
|--------------------------------|--------------|------|------------------|------|------------------------------|-------|-----------------------------|-------|
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 436.04 | – | 373.4 | – | 48.0 | – | 14.6 | – |
| Inmediato planes optimizados | 425.73 | 2.36 | 367.3 | 1.64 | 44.6 | 7.13 | 13.9 | 5.26 |
| Dos ciclos planes optimizados | 427.06 | 2.06 | 372.6 | 0.23 | 41.4 | 13.68 | 13.1 | 10.76 |
| Tres ciclos planes optimizados | 417.69 | 4.21 | 362.3 | 2.97 | 42.2 | 12.05 | 13.1 | 10.12 |
| Propuesto (ACO) | 406.02 | 6.89 | 352.8 | 5.51 | 40.4 | 15.80 | 12.8 | 12.76 |

El método propuesto presenta el mejor costo social asociado, constante que se mantiene para todos los componentes de la función de costo, esto no pasa con el método de tres ciclos el cual presenta buenos rendimientos en cuanto al costo social a nivel global pero no tan buenos en cuanto al costo para el medio ambiente, en este caso el método de dos ciclos presentó mejoras más sustanciales.

Los resultados para las calles secundarias se resumen en las Tablas 6 y 7, como se puede observar para este caso las mejores medidas de desempeño global se presentan cuando se usa el método de transición de dos ciclos, seguidos del método propuesto, pero si se observa a detalle, el método propuesto presenta mejor desempeño para el medio ambiente, mientras el método de dos ciclos presenta mejor desempeño en lo referente al tiempo de demora, lo cual repercute altamente en el componente social dado el número de personas que al que sirve este sistema. Lo anterior refuerza que la optimización previa que se realizó a los planes de transición actuales beneficia el tiempo de demora para las calles secundarias, pero el mayor peso del costo social se encuentra en la calle principal, la cual beneficia en mayor grado el método propuesto.

Otro hecho a destacar es que el método de dos ciclos para este subsistema no mantiene sus niveles de mejoras para el componente asociado al consumo de combustible.

Por último, para ir más al detalle y teniendo en cuenta que una de las intersecciones más críticas en el tema de congestión para este tramo de red es la comprendida por el cruce de Paseo General Dávila con la Calle Alonso Vega hasta el tramo de Bajada San Juan, la cual se aisló en este estudio para obtener los resultados del costo social asociados a cada método de transición en este nodo crítico.

Los resultados para esta intersección se muestran en las Tablas 8 y 9, donde se puede observar importantes mejoras con respecto al método actual.

Sin embargo, los mejores desempeños se logran con el método de dos ciclos, y este junto con el método de tres ciclos, presentan mejores desempeños con respecto a los usuarios. El método propuesto no presenta mejoras consistentes en lo referente a los componentes de la función de costo, pero si un buen desempeño global, aunque no es el mejor.

En general, se puede decir que el método propuesto presentó buenas medidas de desempeños tanto para el sistema global, como para la calle principal Paseo General Dávila. El método actual presentó desempeños menos amigables con el medio ambiente y el usuario. Y en general los métodos propuestos presentan niveles de mejoras importantes en los componentes asociados con el medio ambiente.

Tabla 6. Resultados demora y tiempo total de viaje para calles secundarias

| Método | Demora | | Tiempo Total | |
|--------------------------------|---------|--------|--------------|-------|
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 13.82 | – | 10.8 | – |
| Inmediato planes optimizados | 12.18 | 11.85% | 10.0 | 7.73% |
| Dos ciclos planes optimizados | 11.90 | 13.92% | 9.8 | 9.92% |
| Tres ciclos planes optimizados | 12.68 | 8.24% | 10.5 | 2.94% |
| Propuesto (ACO) | 12.18 | 11.92% | 10.0 | 7.96% |

Tabla 7. Resultados costo social para calles secundarias

| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
|--------------------------------|--------------|--------|------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 182.77 | – | 155.4 | – | 21.3 | – | 6.1 | – |
| Inmediato planes optimizados | 171.43 | 6.20% | 145.8 | 6.17% | 20.0 | 6.23% | 5.6 | 6.95% |
| Dos ciclos planes optimizados | 160.57 | 12.15% | 134.8 | 13.22% | 20.1 | 5.79% | 5.6 | 7.06% |
| Tres ciclos planes optimizados | 175.98 | 3.71% | 147.9 | 4.82% | 22.0 | -2.85% | 6.2 | -1.48% |
| Propuesto (ACO) | 163.96 | 10.29% | 139.3 | 10.31% | 19.2 | 9.87% | 5.4 | 11.28% |

Tabla 8. Resultados demora y tiempo total de viaje para intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega

| Método | Demora | | Tiempo Total | |
|--------------------------------|---------|--------|--------------|--------|
| | Seg/veh | % | Horas | % |
| Inmediato planes actuales | 10.31 | – | 8.08 | – |
| Inmediato planes optimizados | 7.99 | 22.46% | 6.56 | 18.84% |
| Dos ciclos planes optimizados | 7.44 | 27.87% | 6.10 | 24.52% |
| Tres ciclos planes optimizados | 7.91 | 23.32% | 6.55 | 18.89% |
| Propuesto (ACO) | 8.08 | 21.62% | 6.62 | 18.09% |

Tabla 9. Resultados costo social para intersección Paseo General Dávila-Alonso Vega

| Método | Costo Social | | Costo del tiempo | | Costo operativo del vehículo | | Costo de emisiones de gases | |
|--------------------------------|--------------|--------|------------------|--------|------------------------------|--------|-----------------------------|--------|
| | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % | EUR € | % |
| Inmediato planes actuales | 136,20 | – | 118,1 | – | 14,0 | – | 4,1 | – |
| Inmediato planes optimizados | 112,72 | 17,24% | 99,4 | 15,90% | 10,26 | 26,65% | 3,08 | 24,02% |
| Dos ciclos planes optimizados | 97,88 | 28,13% | 85,3 | 27,84% | 9,73 | 30,47% | 2,90 | 28,61% |
| Tres ciclos planes optimizados | 107,73 | 20,90% | 94,0 | 20,44% | 10,57 | 24,48% | 3,17 | 22,05% |
| Propuesto (ACO) | 107,68 | 20,94% | 94,3 | 20,18% | 10,31 | 26,28% | 3,07 | 24,47% |

5. CONCLUSIONES

En esta investigación se define matemáticamente la transición y a este modelo es aplicado un algoritmo de optimización de colonia de hormigas que permite encontrar los parámetros óptimos para la transición. Por último, se presenta el diseño de un plan de transición para un tramo de la red semafórica del Paseo General Dávila en la ciudad de Santander y un análisis de los resultados obtenidos con el modelo propuesto es realizado.

Se establecieron comparaciones que incluían diferentes escenarios con métodos tradicionales tales como: transición inmediata, en dos ciclos, en tres ciclos y el método propuesto. Se concluyó que el método propuesto presentó buenas medidas de desempeño tanto para el sistema global, como para la calle principal paseo General Dávila, con mejoras en el costo social con respecto al método actual de alrededor del 8% y 7% respectivamente. En general los métodos propuestos presentan niveles de mejoras importantes en los componentes asociados con el medio ambiente. Una segunda alternativa para realizar la transición fue el método de dos ciclos, que además demostró favorecer las medidas de desempeño para las calles secundarias. Por último, se puede decir que el método usado actualmente evidenció desempeños menos amigables con el medio ambiente y el usuario.

En general se puede concluir que la metodología de transición propuesta se presenta como una alternativa para mitigar los problemas de la congestión y contribuir a través del uso de la modelística matemática en el diseño de políticas de transporte flexibles que permitan la

gestión mejorada del tráfico en tiempo real y que integren el componente ambiental con el componente social.

REFERENCIAS

- AKÇELIK, R. (1983). *Progress in fuel consumption modelling for urban traffic management*.
- AKÇELIK, R., Y BESLEY, M. (2003). *Operating cost, fuel consumption, and emission models in aaSIDRA and aaMOTION*. Paper presented at the 25th Conference of AUSTRALIAN INSTITUTES OF TRANSPORT RESEARCH (CAITR 2003), University of South Australia, Adelaide, Australia.
- B. NATIONAL RESEARCH COUNCIL. TRANSPORTATION RESEARCH. (2010). *HCM 2010: highway capacity manual*. Retrieved from <http://www.hcm2010.org/>
- BALKE, K., RAO, K., Y HUSTED, M. (1998). *Incorporating the Effects of Signal Transitions in the selection of Timing Plans in Traffic Responsive Signal Systems*. Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station.
- BALKE, K., RAO, K., Y HUSTED, M. (1998). *Incorporating the Effects of Signal Transitions in the selection of Timing Plans in Traffic Responsive Signal Systems*. Texas: Texas Transportation Institute, Texas A&M University, College Station,.
- CEDEX, C. D. E. D. D. Y. O. P. (2010). *Evaluación Economica de Proyectos de Transporte*.
- COHEN, D., HEAD, L., Y SHELBY, S. G. (2007). *Performance analysis of coordinated traffic signals during transition*. Transportation research record (2035), 19-31.
- FREY, H. C., ROUPHAIL, N. M., UNAL, A., Y COLYAR, J. D. (2001). *Emissions reduction through better traffic management: An empirical evaluation based upon on-road measurements*.
- KOONCE, P., RODEGERDTS, L., LEE, K., QUAYLE, S., BEAIRD, S., BRAUD, C. Y URBANIK, T. (2008). *Traffic signal timing manual*.
- LEE, J., Y WILLIAMS, B. M. (2012). *Development and evaluation of a constrained optimization model for traffic signal plan transition*. Transportation Research Part C-Emerging Technologies, vol. 20, pp. 185-198.
- LIEBERMAN, E., Y WICKS, D. (1974). *A Rapid Signal Transition Algorithm*. Journal of the Transportation Research Board, vol. 509, pp. 158-168.
- PARK, B. B., SANTRA, P., YUN, I., Y LEE, D. H. (2004). *Optimization of time-of-day breakpoints for better traffic signal control*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1867, pp. 1217-1223.
- PENABAENA-NIEBLES, R., CANTILLO, V., CUENTAS, S., Y MOURA, J. L. (2014). *Transition between Signal Timing Plans: A Methodological and Analytical Overview*. Transport Reviews, 34(3), 356-378. doi: 10.1080/01441647.2014.905648.
- PEÑABAENA-NIEBLES, R., CANTILLO, V., Y MOURA, J. L. (2014). *Impact of transition between signal timing plans in social cost based in delay, fuel consumption and air emissions*. Transportation Research Part D: Transport and Environment.
- PEÑABAENA-NIEBLES, R., CANTILLO, V., Y MOURA, J. L. (2015). *Impact of*

transition between signal timing plans in social cost based in delay, fuel consumption and air emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 41, 445-456. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.trd.2015.10.018>

SELEKWA, M. F., MUSSA, R. N., Y CHITESHE, A. (2003). *Application of LQ modelling and optimization in urban traffic control.* Optimal control applications & methods, vol. 24, pp. 331-345.

SENDECO2. (2015). *SISTEMA EUROPEO DE NEGOCIACIÓN DE CO₂: Precios CO₂.* Retrieved 10/08/2015, 20015, from <http://www.sendeco2.com/es/precios-co2>

SHELBY, S., BULLOCK, D., Y GETTMAN, D. (2006). *Transition Methods in Traffic Signal Control.* Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, vol. 1978, pp. 1130-1140.

SHINE, K. P. (2001). *Radiative forcing of climate change.* Solar Variability and Climate, 363-373.

TONG, H. Y., HUNG, W. T., Y CHEUNG, C. S. (2000). *On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions.* Journal of the Air & Waste Management Association, 50(4), 543-554.

WING-TAT, H., HING-YAN, T., Y CHUN-SHUN, C. (2005). *A Modal Approach to Vehicular Emissions and Fuel Consumption Model Development.* Journal of the Air & Waste Management Association (Air & Waste Management Association), vol. 55, 1431-1440.



41 Planning for the implementation of an adaptative traffic control system

Angélica Lozano

Francisco Granados

Alejandro Guzmán

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería, México

ABSTRACT

This paper presents an introduction to the components of an Adaptive Traffic Control Systems (ATCS): sensors, controllers, communication, traffic control center and ATCS software. Later, the steps of the process for planning the implementation of an ATCS is explained, including: the information obtaining, the identification of needs for current and future situations, the definition of objectives, the requirements identification and the choice of strategies for each implementation stage, the identification of sub-systems, the assessment of performance indicators, and the project implementation. Many cities in Latin America have tried to implement ATCS, however, results have not achieve the expected objectives. Hence, this paper describes the common problems for the implementation of ATCS in Latin America.

Keywords: traffic control, ATCS, ITS

1. INTRODUCTION

An Advanced Transport Management System (ATMS) is an Intelligent Transportation System (ITS) whose objective is to improve the flow in the network and ensure its use in the best way, reducing traffic problems, pollution, accidents and fuel consumption.

Zageye et al., (2009) study a predictive control framework to reduce emissions, fuel consumption and travel time, using a dynamic control of limit speed, by means simulation and an integrated macroscopic-microscopic model. They found that the reduction of travel time or the improvement of traffic flow do not always guarantee the reduction of traffic-related nuisances such as air pollutions, noise and fuel consumption. They used a multi-criterion objective function in order to address the multi-faceted problem.

A Traffic Control System is a subsystem of an ATMS, with the following functions: obtaining information from the road network through various types of sensors (detectors);

controlling traffic lights by using such information; and providing information to drivers and sending instructions to the control center (Ontario Traffic Manual, 2007). A controller can enable a type of control, among the following: time-based coordination, time-of-day, actuated, responsive and adaptive. A traffic system with adaptive control is an Adaptive Traffic Control Systems (ATCS).

The following sections discuss the planning for the implementation of an Adaptive Traffic Control Systems (ATCS). The subsequent sections are as follows. Section 2 presents the components of an ATCS. Section 3 presents the steps for planning the implementation of an ATCS. Section 4 describes the common problems for implementing ATCS in Latin America. Finally, references are included.

2. ADAPTIVE TRAFFIC CONTROL SYSTEMS

An ATCS adapts traffic lights plans to volumes and traffic patterns of the current flow, on real time. It continuously updates traffic lights plans, reacting to the traffic conditions on real time, by using information from sensors. The objective is to improve the traffic conditions, reducing travel time, number of stops, fuel consumption and air pollution.

An ATCS uses real-time traffic data provided by sensors, to make change on green time, cycle time and coordination of a set of traffic lights in a zone.

The data from an ATCS are both supply and demand of the side of the traffic process. An ATCS adjusts supply conditions to match locally observed traffic (Pascale et al, 2015).

2.1 Components of an ATCS

The components of an ATCS are detectors or sensors, controllers, traffic lights, communications and Traffic Control Center (Gordon and Tighe, 2005).

2.1.1 Sensors

Sensor detect characteristics of flows, as speed, density, volume, occupancy, turning ratios, and vehicle identification (Gentili and Mirchandani, 2012). Sensors detect vehicles (including bicycles) or pedestrians. Two basic types of sensors exists: intrusive type, as inductive loop, and non-intrusive type, as magnetic detector, video-detector, microwaves and radar detector, infrared detector, radar-laser detector and ultrasonic detector (Middleton and Parker, 2002; Mimbela and Klein, 2007). Figure 1 shows video-detectors.

Gentili and Mirchandani (2012) classify sensor, according the obtained information, into the following four groups: a) Counting sensors, based on vehicle counts, they let to know the

lane performance. b) Image sensors, which obtain images of moving vehicles; they allow to know flow movements at intersections. c) Path-ID sensors, which allow obtain the flow of each path of the link where it is located assuming communication with a certain type of vehicle (for example, hazardous materials vehicles), and d) Vehicle-ID sensors, used to identify a vehicle ID on the network (for example, license plate readers, RFID readers); they allow monitor travel times.

The decision about the location of these sensors must be carefully in order to ensure that they provide the desired measurements. Sensors can be located on nodes (intersections) or links of the network.

Proposed models and solution for the sensors optimal location problem have emerged during several years. These models depend on the type of sensor, the available information, and the flow of interest. Gentili and Mirchandani (2012) present a state of the art of these models, and classify them into two groups: sensor location flow-observability problem (when there is a unique solution) and sensor location flow-estimation problem (to best improve the quality of the flow estimation). The sensor location flow-estimation problem is a bilevel problem where the upper level decides where the sensors are to be located, and the lower level computes the best estimate of the flows for each of the candidate locations according a given evaluation criterion.

Pescaru and Curiac (2014) present a technique to classify the near future traffic conditions and make efficient decisions for adapting the traffic light sequences in a small urban zone, to optimize traffic flows, based on traffic sensors located only on main roads of the zone.

A vehicular sensor network (sensors installed in vehicles) can be useful for traffic control. Placzek (2012) presents a method of selective data collection for traffic control, which provides a reduction of data transmitted through the network. The transmission of sensor data from vehicles to the control node occurs only at certain time moments. They use on-line traffic simulation and uncertainty estimation.

The choice of the types of sensor and the locations of the sensors depend on what information is required to solve the specific traffic problem. The problem's objectives must be previously defined.

2.1.2 Controllers

Controllers are an important part of the hardware of an ATCS. There are two types of controller, a local control is located at an intersection and a central control is located at a control center.

Usually, a controller regulates the traffic lights at an intersection. A controller is an electronic device that enable an orderly sequential shift of traffic lights. Controllers coordinate traffic control with other controllers, they are interconnected to a traffic control center, collect traffic information (by means sensors), provide appropriate signaling and report irregular operation to the control center.

A controller include a processor board with the software. Each traffic control software can support just some specific types of controllers, i.e. the controllers that satisfy specific standards. The compatibility between a traffic control software and the controllers is fundamental in order to guarantee the operation of the system. Certain type of controller can provide adaptive control; it is compatible with an ATCS.

The controller and complementary devices (such as malfunction management unit, bus interface unit, router, power supply, load switches, etc.) are located inside a cabinet (see Figure 2).

2.1.3 Communication

A central computer controls decisions and actions of individual controllers, by means a communication network. In case of the communication breaks, local controllers have to operate without real-time control and use their backup plan, which is usually time-based coordination. During a communication break, only the operations provided by local controllers remain. The ATCS software determines the characteristics of such operations.

Communication is used for disseminate traffic information to outside agencies (OTM, 2007); the communicated subsystems include data, video and voice signals from the field equipment, dynamic message signs, CCTV cameras, emergency phones, etc.

Communication problems are among the most important generators of an ATCS malfunction, and communication represents a significant cost.

There are different types of communication technology (twister pair, Ethernet, optical fiber, phone network, wireless using public communications, microwave, etc.), and standards (NTCIP, DATEX II, UTMC, etc.). Cable communication has a higher reliability.

2.1.4 Traffic Control Center

A Traffic Control Center (TCC) must optimize traffic flow, monitor traffic, control traffic, and provide traffic information. A TCC needs resources, including equipment, communication, servers and workstations, and display devices.

A central computer in a TCC keeps communication with the controllers located in field and with the subsystems to disseminate traffic information.

The technical staff of a TCC must include a manager, a traffic supervisor/coordinator, a traffic engineer, the system technical support officer(s), and operators for incident response, traffic coordination and operation (OTM, 2007).

Staff training is also very important. Inadequate training of the staff can cause a failure to obtain the expected benefits of the system, or an improper operation of the system which generate more traffic problems.

An ATCS software includes/determines the following: the centralized software; the software that operates controllers (called local software); the presence, type and configuration of the traffic sensors; and the communication infrastructure among all these components. The compatibility of an adaptive centralized traffic control software with the traffic control devices and the communications standards is essential for the good performance of an ATCS.

Before choosing an ATCS, a meticulous comparison of ATCS must be performed considering the following (Stevanovic, 2010): detection, type of action, adjustment method, adjustment time, hierarchical level, traffic model, flexibility, public transport priority, etc. The choice depends on the specific requirements of the city where to implement the ATCS. A certain ATCS can be unnecessary for a city, or only necessary for some parts of the city. If a system has more functionalities than necessary, not using them is a waste of money.

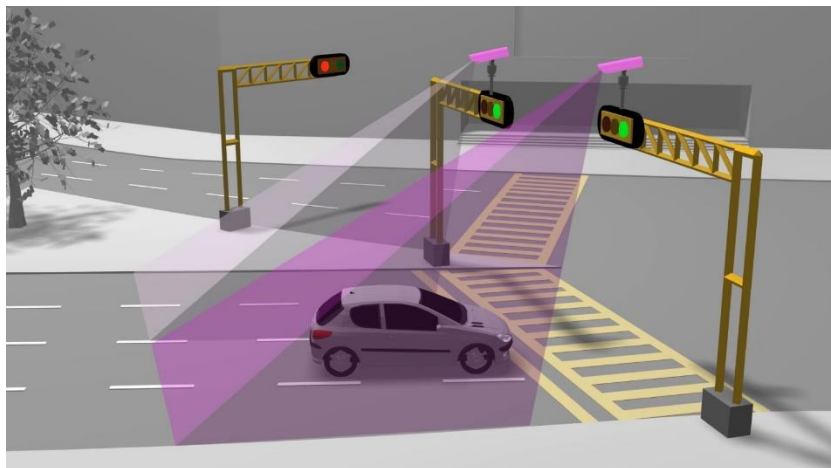


Figure 1. Traffic lights and vehicle sensors

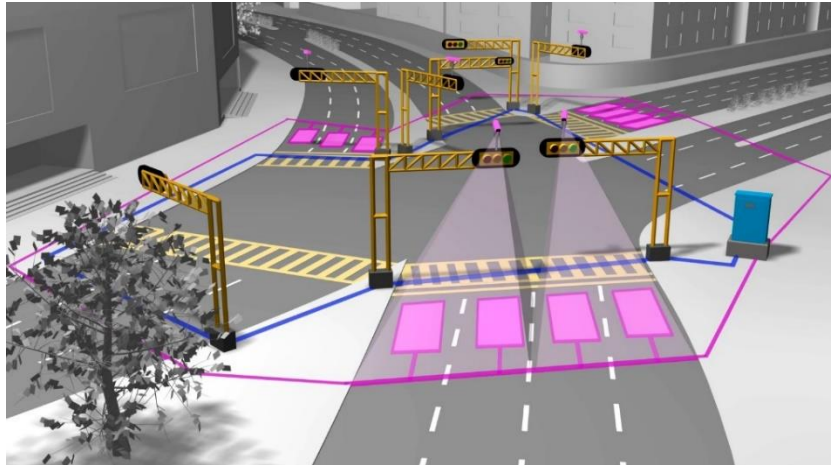


Figure 2. Controller and vehicle sensors

In addition, one must consider that an ATCS can have a good performance in non-saturation conditions, but not in over-saturation conditions. Then, the specific network structure and demand determine the performance of an ATCS, hence a thorough knowledge of the particular problem is required.

3. PLANNING THE IMPLEMENTATION OF AN ATCS

The planning process for the implementation of an ATCS (or any ITS or TCS) have several steps (OTM, 2007). First, the current traffic situation must be known in order to identify needs and objectives. The project scope definition must be in accordance with the needs and objectives. The assessment of the system characteristics must be carried out according to the objectives. Then, the system must be assessed at component level, based on a meticulous review of the current technologies and future trends. Hence, in order to know the current traffic performance and the future performance considering the ATCS implementation, performance metrics must be defined and assessed

The planning process can be long, but it is essential to choose the ATCS appropriate for the city. The choice of an ATCS with more functionalities than the required leads to unused functionalities and then a waste of resources; on the contrary, an ATCS with fewer functionalities than those required does not allow obtaining a feasible improvement.

The implementation of an ATCS must be done as long as, it guarantees that its benefits are greater than those obtained by any other solution.

Around the world, several ATCS projects have failed mainly due to lack of planning or poor planning. Frequently, some steps of the planning process are omitted because they seem trivial, but not including them causes the loss of important elements for planning.

The planning process to implement an ATCS is presented as follows, based on OTM (2007):

3.1 Identification of current situation in the study area

The choice of an ATCS requires knowing the current situation in the study area. What is the situation to be resolved in the study area through the ATCS? To answer the question, one needs a complete knowledge of the current problem.

The following information defines the problem: physical characteristics of road network, traffic operation features, and incidents characteristics.

Physical characteristics of the road network include detailed georeferenced information, as the following: number of lanes and capacity of each road segment (arc) of the network, bans on movements, horizontal and vertical alignment, bridges, traffic devices including their communication and power supply, lighting, etc. This information allows the development of a plan that considers the current equipment, to identify installation requirements and associated costs, and to detect potential problems (OTM, 2007). Often, it is necessary to eliminate or change the existing traffic devices and their communication network, and/or modify the geometrical characteristics of the arcs or intersections of the road network. Such changes are expensive, so they must be taken into account.

The traffic operation features include traffic volumes on some arcs of the network, according the time of day and the day of the week, per type of vehicle. Volumes are required to assess the volume / capacity relationship and identify the maximum demand hours. Profiles of volume and speed are also required for the analysis of the current traffic situation (OTM, 2007). Delay and level of service on intersections allows identify the movements whose operation presents biggest troubles. Delay and level of service on roads make it possible to distinguish inappropriate operation segments. In addition, volume of pedestrians at intersections allows consider them at the traffic light suitably. Moreover, origin-destination information is important to identify the transportation needs.

An incident usually reduces the capacity of some arcs of the network, producing a negative impact on traffic. An incident can increase congestion and reduce the safety of other users of the network. It is important to have updated historical information on each incident, including type, location, severity and period in which it hinders traffic. The location must include the precise geographic coordinates where the incident happed. The causes that produce each incident must be clearly identified (human factor, road, vehicle and/or environment), in a multi-dimensional system. Additionally, the determination of the consequences (material damages, injured and fatalities) of each accident are needed to determine priorities. The analysis of incidents information allows define preventive measures. Accident information

can allow identify the most dangerous intersections and segments of the road (where there are more accidents) and their causes, which can lead to modifications that reduce accidents. To reduce incidents, there may be changes in regulations for drivers, pedestrians or vehicles, or in the physical and operational characteristics of the road.

The analysis of the mentioned information allows identify the current traffic situation in the city (study area), and where the most serious problems that an ATCS could solve are. However, the results of the analysis could indicate that some of the problems can be solved by means other solutions, in such case an ATCS must not be implemented.

As mentioned, some indicators must be determined to define the current situation in the study area, such as level of service and number of collisions, which reflect the traffic conditions and safety of each arc (road segment) and intersection.

3.2 Forecasting of future traffic conditions

The forecasting of the future level of service of the traffic conditions requires the following information: georeferenced future characteristics of the network (network changes), projections of the volume of traffic for some future horizons, and projections of origin-destination information.

The future traffic volumes depends on several factors as how the city is expected to grow, which includes the land use changes and the changes on transportation services infrastructure and road infrastructure. The policies relates to transportation, urban development, emissions and safety can also influence the traffic volumes. Such changes also can modify the travel needs, expressed through the origin-destination information.

The analysis of historical incident data should allow projections of incidents in the network. The incident forecast must consider the previously mentioned changes in the city and the implemented policies.

Traffic microscopic and/or microscopic models are useful to represent and assess current and future situations.

3.3 Identification of needs for current and future problems

The identification of the current and future problems, which need solution, is essential. These problems relate to congestion and safety in certain parts of the network.

The generation and analysis of several scenarios is essential. Such scenarios (for the current

and future situations) must consider several kinds of solution, not just the ATCS solution.

The performance of each scenario is measured through predefined indicators. The assessment of the situation of future horizons must use the same indicators as for the current situation.

The assessment and comparison of the scenarios allow identify the best solution for each time horizon. A multi-criteria analysis allows the choice of the best solution; it can consider several criteria as travel time, safety, fuel consumption, emissions, among others.

All the stakeholders must be involved in the generation of the set of solution alternatives: public transport, freight transport, network maintenance entities, traffic authorities (in case of a large city, metropolitan authorities), land use entities, etc., to identify additional problems in the transportation system.

Sometimes, the solutions are simple as traffic light coordination or physical changes on the road. Just some problems require an ATCS.

It is important to emphasize that an ATCS performs well for under-saturated condition but not on over-saturated conditions. The system on over saturated conditions can go to gridlock (Pascale et al., 2015).

When an ATCS is the best solution, then next steps must be followed.

3.4 Setting the ATCS objectives

Some objectives of an ATCS are the following (OTM, 2007): increasing capacity and operational efficiency; increasing productivity of freight transportation; improving safety, and reducing environmental impact. The objectives choice depends on the characteristics, needs and longings of each city or study area.

Monitoring the ATCS performance helps to know how well the objectives are been achieving and to quantify the benefits. Multi-criteria analysis must be done before and after the ATCS implementation.

3.5 Reviewing plans and requirements

Plans for implementing and operating an ATCS must be developed, identifying the human and material requirements in each stage. The stages have to include several stages, before and after the ATCS implementation. It is necessary identify and involve all the stakeholders in each stage.

The coordination among inter-jurisdictional agencies (or metropolitan agencies) is crucial to develop joint strategies to manage traffic, during the implementation and when the ATCS is operating. Even when the study area belongs to just one jurisdiction, the coordination with the adjacent jurisdictions must be established.

The implementation stage can include civil work, producing total or partial road closures. Also maintenance works can produce road closures. This information must be sent to the neighboring jurisdictions and the drivers. The ideal way for informing drivers should be via variable messages located long before the closed road, so in other jurisdictions. If this technology is not available (in the neighboring jurisdictions), traffic operations can be implemented by traffic agents.

In case of incidents during the ATCS implementation or later, the information must reach the drivers, along with information on alternative paths.

The alternative paths can be obtained by using a traffic analysis tool, using the previously mentioned field information and with a good calibration. This tool allows determine the response plans in case of road closures.

In any case, the coordination with other jurisdictions is fundamental.

3.6 Choosing the strategies

The management of congestion and accidents requires the definition of strategies. Traffic management strategies allow reduce congestion and its negative impacts (emissions, costs, quality of life, among other). Traffic management strategies are able to use the road capacity in the best way. In case of road maintenance, traffic management strategies can reduce congestion and improve the safety on the road. Some of such strategies are real time traffic information for users, lane management, high occupancy vehicle lanes, etc.

The aim of incident management strategies is to reduce the duration of the incident and consequently reduce its impacts on safety and congestion, at each stage of the incident. It is necessary to define the incident response, and the responsible of each part of the response.

3.7 Identification of components and sub-systems of a ATCS

An ATCS is composed mainly of the previously parts described, however several additional subsystems are required to facilitate the traffic management strategies.

Some types of subsystems are the following: monitoring systems (vehicle detection, CCTV), user information (traveler information systems, message variable signs, queuing information signs), and traffic control (traffic lights, access control on ramps, lanes management).

Additionally, engineering works in field for installing controls, traffic lights, communication network, and all the required devices, are required.

If any of these systems are not taken into account, the consequence is the system does not work or does not work properly or as planned, hence the expected objectives are not achieved. In this case, additional monetary resources and time are required to make the ATCS works as planned, but such resources are not easy to obtain because they were not budgeted. Worse, as the system does not work as expected, confidence in its benefits is lost, so getting resources to improve it becomes more difficult.

3.8 Performance Indicators

In order to compare scenarios and solutions on them, a set of performance indicators must be defined. For the current scenario, some indicators can be calculated from fieldwork information, and other indicators have to be estimated by means a traffic modeling tool and other techniques. For other scenarios (including future scenarios), the indicators have to be estimated using a traffic modeling tool and other techniques. Calibration is very important for the traffic models.

Safety indicators allow know safety conditions on the road arcs (for each road segment) and intersections.

Some of the most used traffic and congestion indicators are the following: level of service, travel time, delays and emissions. Some safety indicators are number of collisions and number of pedestrians run over.

The same performance indicators must also be calculated for the other stages of the ATCS, such as implementation, maintenance times and operation, in order to compare the modeled situation against the real ones, and make corrections on the strategies if necessary. New fieldwork information and the models updates may be required.

3.9 Implementation of the project

Finally, some recommendations for the implementation of an ATCS are the following (OTM, 2007):

- To define the scope of the project.
- To prioritize the identified problems, according the scenarios assessment considering impacts and costs/benefits.
- To develop a schedule of the implementation, considering resources and time needed in each stage.
- To establish a coordination with other jurisdictions.
- To obtain a preliminary budget.

- To include key areas of expertise: system definition, specifications and detailed design, software development, installation of electrical and civil supply, installation of subsystems in the field, integration and testing, operation and maintenance support. In each area, just truly specialized staff (on ATCS) must work. The expertise areas must be inter-related, in order to properly advance towards the expected objectives.

Usually, a plan has several forms of implementation and can be modified over time according to changing situations.

Long time, a lot of information and the involvement of all stakeholders for several years are required for implementing an ATCS (OTM, 2007).

4. ATCS IMPLEMENTATION IN CITIES OF LATIN AMERICA

Due to the increasing of traffic and pollution problems, many cities have tried to replace their current traffic control systems or implement a new one.

Regrettably, many cities of developing countries do not follow the steps for planning the implementation of an ATCS. They generally do not have information to know the current performance of the system and its characteristics, and cannot predict future traffic given future changes in the network and land use. Consequently, they cannot identify their current and future needs and problems. Hence, they cannot assess whether an ATCS is effectively required to solve their problems, or other solution is better.

Therefore, such cities cannot establish the appropriate ATCS objectives, nor their performance indicators. Additionally, the objectives of the project are not defined together with all the stakeholders related to the problem, and adjacent jurisdictions are not taken into account. Metropolitan projects are scarce.

The plans and requirements, the strategies to achieve objectives, the need for subsystems and the assessment of the available technologies, are not considered until implementation difficulties arise.

The lack of information and analysis makes that choice of the system based only on the offers by providers, without adapting to the needs of the city needs and technology trends. Regrettably, the assessment of the current and future performance of the system is not considered as a part of the project.

In general, if an assessment is carried out, decisions consider only one criteria; they are not based on multi-criteria analysis.

Additionally, the implementation is carried out in a very short time, solving problems and difficulties as they appear.

Hence, the ATCS implemented does not achieve the expected objectives of reducing congestion, emission and accidents of the city or study area. It usually takes a long time to correct the errors that arise, and it is expensive.

Therefore, in order to properly implement an ATCS, the above mentioned steps must be followed.

REFERENCES

- GENTILI M., MIRCHANDANI P.B. (2012) Locating sensors on traffic networks: Models, challenges and research opportunities. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* 24, 227–255.
- GORDON, R.L., AND TIGHE, W. (2005) Traffic Control Systems Handbook. Report Number: FHWA-HOP-06-006, Office of Transportation Management, *Federal Highway Administration* (FHWA), Washington, D.C., USA.
- HUNT, P.B., ROBERTSON D.I., BRETHERTON R.D. AND ROYLE M.C. (1982) The SCOOT on-line traffic signal optimization technique. *Traffic Engineering & Control* 23(4).
- MIDDLETON, D. AND PARKER, R. (2002) Vehicle Detector Evaluation, Report Number: FHWA/TX-03/2119-1, FHWA (Federal Highway Administration), *Texas Department of Transportation*, Austin, Texas, USA.
- MIMBELA, L.E. & KLEIN, L.A. (2007). A Summary of Vehicle Detection and Surveillance Technologies used in Intelligent Transportation Systems. *Federal Highway Administration* (FHWA), Las Cruces, New Mexico, USA.
- OTM (2007) Advanced Traffic Management System. Ontario Traffic Manual. *Ontario Traffic Management Committee*. Ministry of Transportation Ontario. Canada.
- PASCALE A., LAM HOANG T., NAIR R. (2015) Characterization of network traffic processes under adaptive traffic control systems. *Transportation Research C*, 59, 340-357.
- PESCARU D. & CURIAC D-I. (2014) Ensemble based traffic light control for city zones using a reduced number of sensors. *Transportation Research C*, 46, 261-273.
- PLACZEK B. (2012) Selective data collection in vehicular networks for traffic control applications. *Transportation Research C*, 23, 14-28.
- SIMS, A.G., & DOBINSON K.W. (1980) The Sydney coordinated adaptive traffic (SCAT) system philosophy and benefits. *Vehicular Technology, IEEE Transactions* 29 (2), 130-137.
- STEVANOVIC A. (2010) Adaptive Traffic Control Systems: Domestic and Foreign State of Practice. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP). Synthesis 403. *Transportation Research Board*.
- ZAGEYE S.K., DE SCHUTTER B., HELLENDORRN H., BREUNESSE E. (2009) Model-

based traffic control for balanced reduction of fuel consumption, emissions, and time.
Proceedings of the 12th IFAC Symposium on Transportation Systems, Redondo Beach, CA,
USA, September 2-4.

SECCIÓN 8

TRANSPORTE Y USO DEL SUELO

TRANSPORT AND LAND USE

42 Desenvolvimento e calibração de método de geração de viagens para empreendimentos hoteleiros

Henrique Eduardo Araújo Coelho

Rogério Faria D'Avila

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Brasil

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a calibração de um modelo de geração de viagens para hotéis localizados na região centro-sul do município de Belo Horizonte (Brasil). A metodologia foi de pesquisa exploratória e foram levantados dados de 10 hotéis com as características distintas para que fosse possível realizar uma correta avaliação e calibração de um modelo único independente da característica do hotel. A pesquisa consistiu em contagem veicular na garagem dos hotéis e dos veículos que param nas ruas para acessar o hotel. Com auxílio do Minitab, foi calibrado, através de regressão múltipla com as variáveis número de funcionários e número de quartos. O modelo proposto apresentou desvio médio de 5%, se comparado com outros modelos desenvolvidos para hotéis, como ITE (2008), Feitosa e Balassiano (2003), Ackeret e Hosea (2003) e Goldner e Inocêncio (2007), verificou-se que todos estes apresentam desvios superiores a 50% em relação às estimativas de fluxo de veículos obtidas nas pesquisas. De forma geral, o modelo desenvolvido neste artigo apresentou resultados melhores dos que os desenvolvidos até então.

Palavras chave: Polos Geradores de Viagens e Modelagem Matemática.

1. INTRODUÇÃO

O conceito de PGT (Polo Gerador de Tráfego) passou a ser denominado, posteriormente, como PGV (Polos Geradores de Viagens), quando deixou de considerar somente o tráfego individual motorizado gerado pelos empreendimentos, e incluiu as viagens em geral e os potenciais impactos no sistema viário e na circulação, bem como na estrutura urbana, relacionados aos aspectos como o uso, a ocupação e a valorização do solo (Kneib et al., 2006). Desde os anos 1950 os PGV's vêm sendo estudados. Dos anos 1970 em diante, as abordagens tornaram-se mais sistemáticas, com respaldo técnico profissional. O crescimento da população e das viagens motorizadas, principalmente através dos veículos individuais (carros), fomentou o estudo dos PGV's.

Portugal e Goldner (2003) definiram inicialmente, Polos Geradores de Tráfego (PGT) como sendo locais ou instalações de distintas naturezas que desenvolvem atividades de porte e escala capazes de produzir um contingente significativo de viagens. O conceito de PGT

passou a ser denominado, posteriormente, de Polos Geradores de Viagens, quando deixou de considerar somente o tráfego individual motorizado gerado pelos empreendimentos e passou a incluir as viagens em geral. Considera, além, os potenciais impactos nos sistema viário e na circulação, bem como na estrutura urbana, relacionados aos aspectos como o uso, a ocupação e a (des)valorização do solo. A importância de avaliar o impacto de um PGT reside na necessidade de minimizar os impactos negativos resultantes da sua implantação. O Código de Tránsito Brasileiro (CTB, 1998) dispõe que nenhum projeto de edificação que possa se transformar em PGT -perturbando ou interrompendo a livre circulação de veículos e pedestres, ou colocando em risco sua segurança- poderá ser aprovado sem prévia anuência do órgão ou entidade com circunscrição sobre a via e sem que do projeto conste área para estacionamento e indicação das vias de acesso adequadas. Conforme Portugal (2012), a previsão de viagens é uma etapa básica para estudos de impactos, e que envolve planejamento de transporte e trânsito nas cidades. No Brasil, no entanto, é um tema pouco investigado, principalmente no que diz respeito a empreendimentos residenciais. Uma suposta hipótese levantada por Portugal (2012) para tentar explicar o porquê dos poucos estudos identificados para empreendimentos residenciais seria a difícil qualificação destes como Polo Gerador de Viagem (PGV), uma vez que os mesmos apresentam características difusas como: casas isoladas, conjuntos habitacionais, edifícios residenciais, condomínios fechados, edifícios de uso misto e áreas de ocupação informal, como favelas e loteamentos clandestinos.

Goldner et al., (2006) menciona que no que tange ao contexto de Engenharia de Tráfego, o assunto de hotéis tem sido pouco explorado. Feitossa e Balassiano (2003) realizaram estudos para hotéis-residência e posteriormente, Goldner et al., (2006) analisou os hotéis da cidade de Florianópolis, em Santa Catarina. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo principal ser um subsídio útil no processo de obtenção de estimativas de viagens geradas em função dos hotéis na cidade de Belo Horizonte. Como produto deste trabalho, espera-se calibrar um modelo de geração de viagens para esse tipo de empreendimento.

2. HOTEIS COMO POLOS GERADORES DE TRÁFEGO

A principal referência bibliográfica sobre modelos de geração de viagens para hotéis é a publicação do *Institute of Transportation Engineers* (ITE) que classifica os hotéis como: hotéis com ou sem suítes, hotéis de negócios, motéis e resort hotéis. As variáveis consideradas nos modelos de regressão do ITE foram: número de quartos ocupados, número de quartos total e número de empregados. A variável estimada (T) representa o número de viagens horárias aos hotéis, na hora de pico de movimento do hotel, tanto de manhã quanto à tarde, na hora de pico de tráfego do sistema viário adjacente ao hotel, entre 07h00min e 09h00min e entre 16h00min e 18h00min. O estudo apresenta, além dos modelos de regressão simples, as taxas de geração de viagens diárias e horárias para os cenários descritos, bem como as percentagens do fluxo entrando e saindo. Foram elaborados modelos para um dia de semana típico, para o sábado e para o domingo. O número de hotéis por categoria utilizado

para a calibração dos modelos de geração de viagens variou para cada caso específico.

Feitosa e Balassiano (2003) realizaram um estudo de geração de viagens em hotéis-residência na cidade do Rio de Janeiro, onde levantaram dados qualitativos como perfil, hábitos de viagem, dentre outros e dados quantitativos (fluxo de veículos) de aproximadamente 80 moradores deste tipo de hotel localizados na zona Sul e na Barra da Tijuca. O período de pesquisa foi em dois turnos: o primeiro, no turno da manhã, entre 07h30 e 11h, e no turno da tarde entre 17h30 e 20h. O artigo também menciona que foi preenchido um formulário complementar por telefone com os administradores destes hotéis afim de obter as informações sobre os picos de entrada e saída, o número de vagas de estacionamento disponíveis e os tipos de serviços oferecidos. Um dos resultados importantes deste artigo está relacionado ao perfil e aos hábitos de consumo dos moradores. Conforme mostra o artigo, esse tipo de polo gerador de viagem tende a abrigar pessoas solteiras e/ou pequenas famílias (sem filhos); além disso, verificou-se uma parcela significativa das viagens realizadas pelos residentes de até 5 km de extensão.

Goldner et al. (2006) realizaram uma pesquisa preliminar em quatro hotéis da cidade de Florianópolis, SC (dois situados no centro e dois nas principais praias), onde se efetuaram entrevistas com os hóspedes e contagens nos estacionamentos e meio-fio de embarque/desembarque. Foram obtidos assim os padrões de viagens a estes hotéis, bem como parâmetros para o dimensionamento dos estacionamentos e da extensão de meio-fio. Devido às flutuações da demanda na cidade, que tem perfil de turismo de verão, levantaram-se as informações em finais de semana e durante a semana separadamente, nos meses de verão (Janeiro e Fevereiro de 2005) e nos meses típicos (primeira quinzena de dezembro de 2004 e abril de 2005). As pesquisas foram planejadas de maneira a se obter trinta entrevistas para cada período, resultando em 240 entrevistas no período típico e 240 para o período de pico, totalizando 480 entrevistas. Esta foi a distribuição teórica da amostra, que não se concretizou em alguns casos devido ao baixo movimento dos hotéis em algumas datas. Neste estudo ficou constatado que aproximadamente 75% das viagens possuem como destinos os shopping centers e o principal modo de transporte é o automóvel.

Goldner e Inocêncio (2007) realizaram um estudo de geração de viagens, em continuidade ao trabalho de Goldner et al., (2006) com uma amostra ampliada de hotéis da cidade de Florianópolis, SC. Em dezesseis hotéis desta cidade, nove localizados no centro e seis nas praias, foram realizados levantamentos dos fluxos de veículos entrando e saindo dos estacionamentos e do meio-fio de embarque/desembarque. Este artigo apresenta uma comparação como modelo do ITE para um cenário de hotel típico com 100 quartos de 47 empregados. Comparando-se as duas realidades, observa-se que os modelos do ITE apresentaram valores 259% maiores que os do modelo proposto, calculando-se através das taxas de viagens médias, e 163% maiores calculando-se através da equação, isto para variável número de quartos. Para variável número de empregados os valores são 151% e 187% maiores, respectivamente.

3. MODELOS DE GERAÇÃO DE VIAGENS

A Tabela 1 apresenta o modelo de geração para hotéis proposto por ITE (2008). Como pode-se perceber, os modelos levam em consideração as variáveis “número de empregados” e o “número de quartos disponíveis pelo estabelecimento”; contudo, verifica-se que cada modelo possui sua respectiva variável independente. Para os modelos que contemplam o número de empregados, o R^2 foi abaixo de 70%.

A Tabela 2 apresenta o modelo obtido no estudo feito por Goldner e Inocêncio (2007). O modelo leva em consideração o número de quartos, empregados e área construída. Verifica-se que os valores para R^2 encontrados neste modelo são menores que os do modelo ITE. Da mesma forma que o modelo ITE (2008), o modelo desenvolvido por Goldner e Inocêncio (2007) apresenta apenas uma variável independente no modelo (número de quartos ou número de empregados ou número de vagas de estacionamento).

O estudo de Feitosa (2003) considera o contexto das viagens relativas a hotéis-residência na cidade do Rio de Janeiro. Para este artigo, foram realizadas aproximadamente 83 entrevistas com moradores desse tipo de hotel localizados na zona sul e na Barra da Tijuca. A Tabela 3 apresenta o modelo obtido.

Há na literatura um modelo proposto por Ackeret e Hosea (1992) para 21 hotéis cassino de Las Vegas, nos EUA. Os modelos de regressão simple e múltipla foram desenvolvidos para as horas de pico da manhã e da tarde, em função de variáveis como o número de quartos, número de empregados e da área do cassino (1000 pés quadrados). Os modelos estimam o número de viagens horárias aos cassinos e apresentam também a distribuição direcional do fluxo (entrando e saindo) e as taxas médias de viagens. Contudo, considerando uma difícil interpretação do resultado e também, fugindo um pouco da concepção do presente artigo, não será apresentado. A Tabela 4 apresenta os modelos desenvolvidos.

Tabela 1. Taxas e modelos de geração de viagens para hotéis

| Período | Variável | Nº Estudo | Distribuição | Taxa | Equação do Modelo | R ² |
|---------------|------------------|-----------|--------------|------|------------------------------|----------------|
| Dia de Semana | Quartos Ocupados | 4 | 50/50 | 8,9 | | |
| Sábado | Quartos Ocupados | 3 | 50/50 | 10,5 | | |
| Domingo | Quartos Ocupados | 3 | 50/50 | 8,5 | | |
| Dia de Semana | Quartos | 10 | 50/50 | 8,2 | $T = 8,95(X) - 373,16$ | 0,98 |
| Sábado | Quartos | 8 | 50/50 | 8,2 | $T = 9,62(X) - 294,56$ | 0,93 |
| Domingo | Quartos | 8 | 50/50 | 5,9 | $\ln(T) = 1,34\ln(X) - 0,11$ | 0,94 |
| Dia de Semana | Empregados | 5 | 50/50 | 14,3 | $\ln(T) = 1,36\ln(X) + 0,96$ | 0,54 |
| Sábado | Empregados | 8 | 50/50 | 12,3 | $\ln(T) = 0,8\ln(X) + 3,47$ | 0,57 |
| Domingo | Empregados | 8 | 50/50 | 8,9 | $T = 9,15(X) - 32,07$ | 0,67 |

Fonte: ITE, 2008

Tabela 2. Modelos de regressão linear - hotéis do centro

| Variável Y | Variável X | Equação | Nº de Casos | R ² | Erro Padrão |
|------------|------------------|--------------|-------------|----------------|-------------|
| Hotel | Nº de Quartos | $Y = 0,972X$ | 9 | 0,824 | 74,96 |
| Hotel | Nº de Quartos | $Y = 1,025X$ | 9 | 0,798 | 85,93 |
| Hotel | Nº de Quartos | $Y = 1,997X$ | 9 | 0,811 | 160,59 |
| Hotel | Nº de Empregados | $Y = 1,781X$ | 9 | 0,636 | 107,7 |
| Hotel | Nº de Empregados | $Y = 1,850X$ | 9 | 0,599 | 121,03 |
| Hotel | Nº de Empregados | $Y = 3,633X$ | 9 | 0,617 | 228,54 |
| Hotel | Nº de Vagas | $Y = 1,108X$ | 8 | 0,561 | 125,92 |
| Hotel | Nº de Vagas | $Y = 1,161X$ | 8 | 0,537 | 138,45 |
| Hotel | Nº de Vagas | $Y = 2,268X$ | 8 | 0,549 | 264,13 |

Fonte: Goldner e Inocêncio, 2007

Tabela 3. Modelos de regressão linear - hotéis do centro

| Fluxo de Viagens | Por dia (07h às 19h) |
|------------------|-------------------------|
| Entrando | 0,76 viagens por quarto |
| Saindo | 0,79 viagens por quarto |
| Total | 1,54 viagens por quarto |

Fonte: Feitosa, 2003

Tabela 4. Modelos de regressão linear

| Estimativa | Período | Variável | Nº de Estudo | Taxa Média | Equação | R ² |
|-----------------|---------|--------------------|--------------|------------|-----------------------|----------------|
| All hotel trips | AM | quartos | 21 | 0,476(x) | $T=0,266(x)+261,001$ | 0,56 |
| All hotel trips | PM | quartos | 21 | 0,731(x) | $T=0,398(x)+401,711$ | 0,44 |
| Strip trips | AM | quartos | 21 | 0,441(x) | $T=0,290(x)+213,221$ | 0,60 |
| Strip trips | PM | quartos | 21 | 0,610(x) | $T=0,514(x)+143,206$ | 0,74 |
| All hotel trips | AM | empregado | 21 | 0,337(x) | $T=0,342(x)-10,334$ | 0,92 |
| All hotel trips | PM | empregado | 21 | 0,550(x) | $T=0,545(x)+9,205$ | 0,79 |
| Strip trips | AM | empregado | 21 | 0,334(x) | $T=0,369(x)-64,984$ | 0,93 |
| Strip trips | PM | empregado | 21 | 0,501(x) | $T=0,578(x)-139,629$ | 0,92 |
| All hotel trips | AM | 1000 pés quadrados | 21 | 11,540(x) | $T=8,216(x)+170,239$ | 0,74 |
| All hotel trips | PM | 1000 pés quadrados | 21 | 17,258(x) | $T=15,905(x)+69,054$ | 0,63 |
| Strip trips | AM | 1000 pés quadrados | 21 | 11,602(x) | $T=8,406(x)+171,46$ | 0,72 |
| Strip trips | PM | 1000 pés quadrados | 21 | 16,744(x) | $T=14,727(x)+109,757$ | 0,59 |

Fonte: Ackeret e Hosea, 1992

4. METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho é composta pelas seguintes etapas: (i) Pesquisa quantitativa e qualitativa; (ii) Determinação dos hotéis; (iii) Calibração do modelo; (iv) Comparação e avaliação dos resultados. O detalhamento das etapas é apresentado a seguir.

4.1 Pesquisa qualitativa e quantitativa

A metodologia de pesquisa utilizada no presente artigo foi de pesquisa exploratória, que se define como o estudo preliminar realizado com a finalidade de melhor adequar o instrumento de medida à realidade que se pretende conhecer. A pesquisa exploratória, permitindo o controle dos efeitos desvirtuadores da percepção do pesquisador, consente que a realidade seja percebida tal como ela é, e não como o pesquisador pensa que seja. Piovesnan (1970) menciona que a pesquisa exploratória contribui para que se conheça melhor as características da população e, assim, planejar mais eficientemente o tamanho amostral. É também, devido ao melhor conhecimento da população que se pode verificar qual a forma de aplicação mais adequada do instrumento, se por autoaplicação ou por entrevista. A pesquisa foi realizada posicionando um colaborador em frente à portaria de entrada e saída de veículos em um dia

típico no período de 24 horas. Os dados foram coletados em função do número de veículos, ou seja, neste primeiro momento não foram segregados os veículos por tipo. Os resultados apresentados serão em função da hora mais carregada do dia (hora de pico) para entrada e saída.

4.2 Determinação dos Hotéis

O levantamento de dados foi realizado na cidade de Belo Horizonte, capital do estado de Minas Gerais, que possui uma população de aproximadamente 2.491.109 habitantes, segundo informações do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2014). Considerando o conceito de pesquisa exploratória, foram selecionados 10 hotéis da região centro-sul do município de Belo Horizonte. Foram considerados hotéis que tivessem vagas de estacionamento interna (seja pago ou não). Com o objetivo de calibrar um modelo através de regressão múltipla foram levantados dados referentes a número de quartos e número de funcionários ativos do hotel. A Tabela 5 apresenta os dados de cada um dos hotéis selecionados para o presente estudo.

4.3 Calibração do Modelo

Para a criação e calibração do modelo foi utilizado o software Minitab que é um software estatístico de capacidades intuitivas. Permite obter estatísticas descritivas, simulações e distribuições, inferência estatística elementar, análise da variância, regressão, análise de dados categóricos, métodos não-paramétricos, análise de séries temporais, etc. O processo de validação do modelo foi através das estimativas do modelo de regressão (Durbin-Watson, Anderson Darlin e Akaike), e para validação utilizou-se de análise de normalidade de resíduos, conforme mencionado em itens anteriores.

Tabela 5. Características dos Hotéis Pesquisados

| ID | Hotel | Quartos | Funcionários |
|----|------------------------------|---------|--------------|
| 1 | Royal Savassi Express Hotel | 77 | 21 |
| 2 | Praça da Liberdade Hotel | 49 | 19 |
| 3 | Royal Savassi Boutique Hotel | 84 | 22 |
| 4 | Hotel Ibis Budget | 300 | 50 |
| 5 | Hotel Ibis Belo Horizonte | 240 | 35 |
| 6 | MK Apart Hotel | 125 | 78 |
| 7 | Champagnat Residence Service | 115 | 63 |
| 8 | Savassi Hotel | 103 | 30 |
| 9 | Royal Golden Hotel | 95 | 24 |
| 10 | Promenade Pancetti | 119 | 97 |

5. RESULTADOS

Este item tem por objetivo apresentar os resultados deste estudo no que diz respeito à calibração de um modelo de geração de viagens para hotéis para o município de Belo Horizonte.

5.1 Calibração do Modelo Proposto

A partir das informações das pesquisas coletadas em campo, foi possível verificar a movimentação de entrada e saída de veículos ao longo do dia para cada um dos dez hotéis avaliados. Importante salientar que o resultado utilizado será o de geração de viagens ao longo do dia. A Tabela 6 apresenta os resultados acumulados ao longo do dia.

A obtenção de um horário de pico global não foi possível em função principalmente, das características dos hotéis levantados. Como pode-se perceber, o presente artigo considerou hotéis com as características normais e também hotéis-residência, que possui um comportamento diferente e isso dificulta encontrar um horário de pico em comum. Considerando esse cenário, optou-se por apresentar os resultados referentes à geração diária, e o impacto referente à hora de pico pode ser extraído em função do percentual desta hora de pico obtido através das pesquisas de fluxo. A partir dos dados de fluxo e características operacionais dos hotéis pesquisados foi possível calibrar um modelo que traduzisse a geração de viagens destes empreendimentos. Com o auxílio do software Minitab foi calibrado o modelo a seguir:

$$\text{Fluxo} = 15,36 + 0,381\text{Quarto} + 2,35\text{Ln}_{\text{Empregados}} \quad (1)$$

Conforme verificado pela saída do software, o valor de explicação do modelo foi de $R^2 = 91,3\%$ e um desvio padrão de $S = 5,365978$. Ao analisar a normalidade dos resíduos através de conceitos estatísticos (Durbin-Watson, Anderson Darlin e Akaike) verificou-se que está dentro dos padrões aceitáveis, ou seja, o modelo é considerado válido ao nível de significância de 5%. A Figura 1 ilustra os resultados obtidos.

Tabela 6. Fluxo Diários dos Hotéis

| Hotel | Quartos | Entrando | Saindo | Gerado |
|-------|---------|----------|--------|--------|
| 1 | 77 | 24 | 26 | 50 |
| 2 | 29 | 14 | 20 | 34 |
| 3 | 84 | 20 | 38 | 58 |
| 4 | 300 | 61 | 83 | 144 |
| 5 | 240 | 43 | 63 | 106 |
| 6 | 125 | 49 | 30 | 79 |
| 7 | 115 | 26 | 40 | 66 |
| 8 | 103 | 36 | 23 | 59 |
| 9 | 95 | 25 | 33 | 58 |
| 10 | 119 | 29 | 46 | 75 |

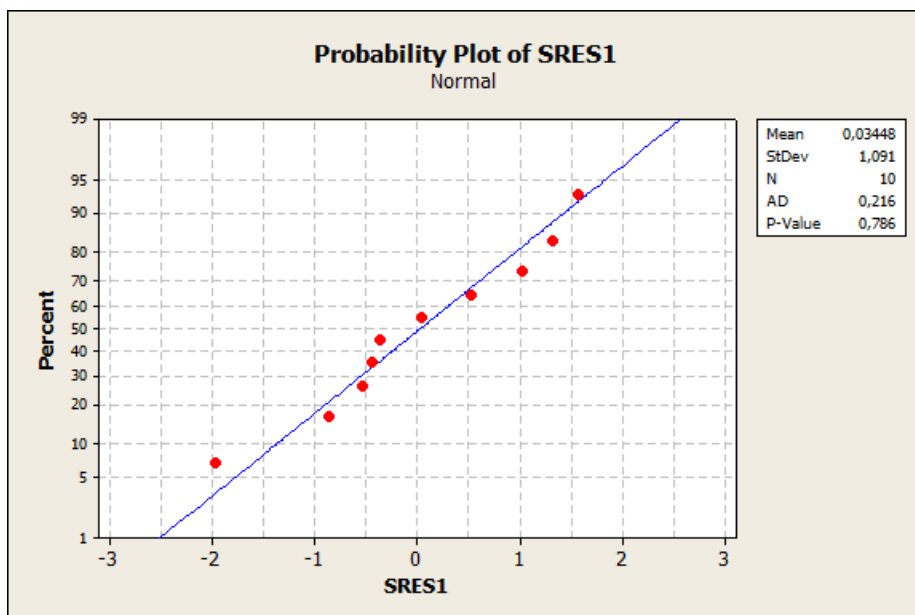


Figura 1. Normalidade dos Resíduos

Tabela 7. Resultado Modelagem

| Hotel | Quartos | Funcionários | Observado | Previsto Modelo | Diferença |
|-------|---------|--------------|-----------|-----------------|-----------|
| 1 | 77 | 21 | 50 | 52 | 4,00% |
| 2 | 29 | 19 | 34 | 33 | 2,94% |
| 3 | 84 | 22 | 58 | 55 | 5,17% |
| 4 | 300 | 50 | 144 | 139 | 3,47% |
| 5 | 240 | 35 | 106 | 115 | 8,49% |
| 6 | 125 | 78 | 79 | 73 | 7,59% |
| 7 | 115 | 63 | 66 | 69 | 4,55% |
| 8 | 103 | 30 | 59 | 63 | 6,78% |
| 9 | 95 | 24 | 58 | 59 | 1,72% |
| 10 | 119 | 97 | 75 | 71 | 5,33% |

Aplicando o modelo encontrado nas variáveis coletadas para o presente estudo obtém-se os resultados apresentados na Tabela 7.

De acordo com a Tabela 5 é possível identificar que o desvio médio do modelo proposta está na ordem de 5%, ou seja, considerando um fator de segurança para estudos envolvendo hotéis-residência pode-se, ao final do processo, incluir 1,05 de ajuste de calibração.

5.2 Validação do Modelo

Com o objetivo de validar o modelo desenvolvido no presente artigo, tomou-se como base os modelos realizados por ITE (2008) e Goldner e Inocêncio (2007) para dias da semana, uma vez que foi neste período a coleta de dados. A Tabela 8 apresenta os resultados a partir do modelo ITE (2008) que considera os padrões especificamente americanos.

Conforme pode ser visto pela Tabela 8, a diferença em percentual do modelo ITE (2008) para as estimativas obtidas em campo são significativamente altas (maior que 500%). A Tabela 10 apresenta os resultados referentes ao modelo desenvolvido por Goldner e Inocêncio (2007).

Conforme pode ser visto pela Tabela 9, a diferença em percentual do modelo Goldner e Inocêncio (2007) para as estimativas obtidas em campo também apresentou-se elevada (maior que 100%). Isso pode ser explicado em função das características americanas aplicadas ao modelo. A Tabela 10 apresenta os resultados referentes ao modelo desenvolvido por Feitosa (2003).

Conforme pode ser visto pela Tabela 10, a diferença em percentual do modelo Feitosa (2003) para as estimativas obtidas em campo apresentou-se elevada (maior que 150%). Isso pode ser explicado em função da característica específica de hotéis-residência. A Tabela 11 apresenta os resultados referentes ao modelo desenvolvido por Ackeret e Hosea (1992).

Segundo mostra a Tabela 11, de todos os modelos avaliados, o que obteve desvio médio menor que 60% foi o modelo desenvolvido por Ackeret e Hosea (1992). A Tabela 12 resume os resultados encontrados em função dos modelos avaliados.

De forma geral, todos os modelos avaliados (mostrados na Tabela 12) apresentam desvio significativamente alto se comparado à estimativa observada em campo e foram calibrados em função de regressão simples. Importante salientar que a ideia central deste estudo é calibrar um modelo de geração de viagens para hotéis único que possui como caso de estudo o município de Belo Horizonte, ou seja, não foi levada em consideração a característica do hotel (cassino, residência e etc). A Tabela 13 apresenta os resultados dos modelos avaliados e as estimativas obtidas pelo modelo calibrado neste artigo.

Tabela 8. Resultado Modelagem

| Hotel | Quartos | Funcionários | Observado | Previsto Modelo (ITE) | Diferença |
|-------|---------|--------------|-----------|-----------------------|-----------|
| 1 | 77 | 21 | 50 | 240 | 380,00% |
| 2 | 29 | 19 | 34 | 138 | 305,88% |
| 3 | 84 | 22 | 58 | 277 | 377,59% |
| 4 | 300 | 50 | 144 | 1423 | 888,19% |
| 5 | 240 | 35 | 106 | 1052 | 892,45% |
| 6 | 125 | 78 | 79 | 862 | 991,14% |
| 7 | 115 | 63 | 66 | 694 | 951,52% |
| 8 | 103 | 30 | 59 | 408 | 591,53% |
| 9 | 95 | 24 | 58 | 337 | 481,03% |
| 10 | 119 | 97 | 75 | 1003 | 1237,33% |

Fonte: ITE, 2008

Tabela 9. Resultado Modelagem

| Hotel | Quartos | Funcionários | Observado | Previsto Modelo (Goldner e Inocêncio) | Diferença |
|--------------|----------------|---------------------|------------------|--|------------------|
| 1 | 77 | 21 | 50 | 56 | 112,00% |
| 2 | 29 | 19 | 34 | 31 | 91,18% |
| 3 | 84 | 22 | 58 | 60 | 103,45% |
| 4 | 300 | 50 | 144 | 190 | 131,94% |
| 5 | 240 | 35 | 106 | 148 | 139,62% |
| 6 | 125 | 78 | 79 | 130 | 164,56% |
| 7 | 115 | 63 | 66 | 112 | 169,70% |
| 8 | 103 | 30 | 59 | 77 | 130,51% |
| 9 | 95 | 24 | 58 | 68 | 117,24% |
| 10 | 119 | 97 | 75 | 144 | 192,00% |

Fonte: Goldner e Inocêncio, 2007

Tabela 10. Resultado Modelagem

| Hotel | Quartos | Funcionários | Observado | Previsto Modelo (Feitosa) | Diferença |
|--------------|----------------|---------------------|------------------|--------------------------------------|------------------|
| 1 | 77 | 21 | 50 | 119 | 137,16% |
| 2 | 29 | 19 | 34 | 45 | 31,35% |
| 3 | 84 | 22 | 58 | 129 | 123,03% |
| 4 | 300 | 50 | 144 | 462 | 220,83% |
| 5 | 240 | 35 | 106 | 370 | 248,68% |
| 6 | 125 | 78 | 79 | 193 | 143,67% |
| 7 | 115 | 63 | 66 | 177 | 168,33% |
| 8 | 103 | 30 | 59 | 159 | 168,85% |
| 9 | 95 | 24 | 58 | 146 | 152,24% |
| 10 | 119 | 97 | 75 | 183 | 144,35% |

Fonte: Feitosa, 2003

Tabela 11. Resultado Modelagem

| Hotel | Quartos | Funcionários | Observado | Previsto Modelo (Ackeret e Hosea) | Diferença |
|-------|---------|--------------|-----------|-----------------------------------|-----------|
| 1 | 77 | 21 | 50 | 21 | 58,70% |
| 2 | 29 | 19 | 34 | 20 | 42,47% |
| 3 | 84 | 22 | 58 | 21 | 63,46% |
| 4 | 300 | 50 | 144 | 36 | 74,68% |
| 5 | 240 | 35 | 106 | 28 | 73,32% |
| 6 | 125 | 78 | 79 | 52 | 34,54% |
| 7 | 115 | 63 | 66 | 44 | 34,03% |
| 8 | 103 | 30 | 59 | 26 | 56,69% |
| 9 | 95 | 24 | 58 | 22 | 61,58% |
| 10 | 119 | 97 | 75 | 62 | 17,24% |

Fonte: Ackeret e Hosea, 1992

Tabela 12. Resumo dos modelos avaliados

| Hotel | Quartos | Funcionários | Observado | ITE (2008) | Goldner e Inocêncio 2007 | Feitosa (2003) | Ackeret e Hosea (2003) |
|-------|---------|--------------|-----------|------------|--------------------------|----------------|------------------------|
| 1 | 77 | 21 | 50 | 240 | 56 | 119 | 21 |
| 2 | 29 | 19 | 34 | 138 | 31 | 45 | 20 |
| 3 | 84 | 22 | 58 | 277 | 60 | 129 | 21 |
| 4 | 300 | 50 | 144 | 1423 | 190 | 462 | 36 |
| 5 | 240 | 35 | 106 | 1052 | 148 | 370 | 28 |
| 6 | 125 | 78 | 79 | 862 | 130 | 193 | 52 |
| 7 | 115 | 63 | 66 | 694 | 112 | 177 | 44 |
| 8 | 103 | 30 | 59 | 408 | 77 | 159 | 26 |
| 9 | 95 | 24 | 58 | 337 | 68 | 146 | 22 |
| 10 | 119 | 97 | 75 | 1003 | 144 | 183 | 62 |

Tabela 13. Resumo dos resultados – Geração de Viagens de Hotéis

| Hotel | ITE 2008 | Dif. % | Goldner e Inocêncio 2007 | Dif. % | Feitosa 2003 | Dif. % | Ackret e Hosea 2003 | Dif. % | Modelo Proposto | Dif. % |
|-------|----------|--------|--------------------------|--------|--------------|--------|---------------------|--------|-----------------|--------|
| 1 | 240 | 380 | 56 | 112 | 119 | 137 | 21 | 59 | 52 | 4 |
| 2 | 138 | 306 | 31 | 91 | 45 | 31 | 20 | 43 | 33 | 3 |
| 3 | 277 | 378 | 60 | 103 | 129 | 123 | 21 | 64 | 55 | 5 |
| 4 | 1423 | 888 | 190 | 132 | 462 | 221 | 36 | 75 | 139 | 3 |
| 5 | 1052 | 892 | 148 | 139 | 370 | 249 | 28 | 73 | 115 | 8 |
| 6 | 862 | 991 | 130 | 165 | 193 | 144 | 52 | 35 | 73 | 8 |
| 7 | 694 | 952 | 112 | 169 | 177 | 168 | 44 | 34 | 69 | 5 |
| 8 | 408 | 592 | 77 | 131 | 159 | 169 | 26 | 57 | 63 | 7 |
| 9 | 337 | 481 | 68 | 117 | 146 | 152 | 22 | 62 | 59 | 2 |
| 10 | 1003 | 1237 | 144 | 192 | 183 | 144 | 62 | 17 | 71 | 5 |

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para geração de viagens de hotéis há quatro modelos disponíveis ITE (2008), Feitosa e Balassiano (2003), Ackret e Hosea (1992) e Goldner e Inocêncio (2007). Contudo, estes modelos apresentam apenas uma variável independente no modelo (quantidade de funcionários ou número de quartos). Uma vez que os modelos disponíveis de geração de viagens em função de hotéis apresentam apenas uma variável independente, considerou-se uma proposta de criar um modelo com mais variáveis de forma a obter um modelo mais robusto retratando de forma mais assertiva a geração de viagens de hotéis em Belo Horizonte, MG.

A metodologia deste trabalho é composta de Pesquisa quantitativa e qualitativa, Determinação dos hotéis, Calibração do modelo, Comparação e avaliação dos resultados. Neste contexto, considerando o conceito de pesquisa exploratória, foram selecionados 10 hotéis do município de Belo que tivessem vagas de estacionamento interna (seja pago ou não). A partir dos dados de fluxo e características operacionais dos hotéis pesquisados foi possível calibrar um modelo que traduzisse a geração de viagens destes empreendimentos. Com o auxílio do software Minitab foi possível calibrar um modelo com explicação $R^2 = 91,3\%$ e um desvio padrão de $S = 5,365978$. Ao analisar a normalidade dos resíduos verificou-se que está dentro dos padrões aceitáveis ao nível de significância de 5%. Após obtenção do modelo foi possível realizar uma comparação entre os quatro modelos disponíveis e o modelo proposto. Se comparado ao modelo do ITE (2008) este superestima em até 600% os resultados. Já em relação ao modelo de Feitosa e Balassiano (2003) este

superestima os resultados em 190%. O modelo proposto por Ackeret e Hosea (1992) superestima os resultados em até 51%. Os resultados apresentados no modelo desenvolvido por Goldner e Inocêncio (2007) superestimam os resultados em 135%. Por fim, o modelo proposto neste artigo apresenta resultados em torno de 5%, ou seja, pode-se considerar que o resultado através do modelo proposto apresenta resultados bem mais satisfatórios que os modelos já desenvolvidos até o presente momento. Válido lembrar que o modelo proposto não leva em considerado o tipo de hotel (cassino, residência e etc).

O modelo desenvolvido possui algumas limitações no que diz respeito a área de abrangência, pois foi realizado exclusivamente para um contexto da cidade de Belo Horizonte, MG. Como recomendação para que o modelo seja utilizado para outros municípios do Brasil sugere-se uma amostra com dados de hotéis de outras regiões para que seja possível uma calibração mais robusta com um desvio, se possível menor ainda.

REFERÊNCIAS

- ACKERET, K.W; HOSEA, R. C. (1992). *Trip Generation Rates for Las Vegas Area Hotel-Casinos*. ITE Journal, May 33-37.
- CTB (1998). *Código de Tránsito Brasileiro*. 2a edição, Ed. Saraiva, São Paulo.
- FEITOSA, T. C. G. (2003). *Gerenciamento da mobilidade em Pólos Geradores de Tráfego: análise de hotéis- residência no município do Rio de Janeiro*. Dissertação de Mestrado. Programa de Engenharia de Transportes, COPPE/Universidade Federal do Rio de Janeiro, RJ.
- FEITOSA, T. C. G.; BALASSIANO, R. (2003). *Gerenciamento da mobilidade em Pólos Geradores de Tráfego: análise de hotéis-residência no município do Rio de Janeiro*. Anais do XVII ANPET- Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro.
- GOLDNER, L. G; VENTURA, T. S. E INOCÊNCIO, P. (2006). *Elaboração de taxas de geração de viagens e parâmetros do estacionamento e do meio fio de embarque/desembarque para hotéis*. Anais do XX ANPET Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Brasília, DF.
- GOLDNER, L. G. Y INOCÊNCIO, P. (2007). *Elaboração de modelos de geração de viagens terrestres para hotéis*. Anais do XXI ANPET- Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, Rio de Janeiro, RJ.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. (2014). *Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD): microdados 2014*. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/trabalhoerendimento/pnad2014/microdados.shtm>>.
- INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS, ITE. (2008). *Trip Generation, 8th edition*. Washington D.C.
- KNEIB E. C., SILVA P. C. M. e TACO P. W. G. (2006). *Identificação e Avaliação de Impactos na Mobilidade: Análise Aplicada a Polos Geradores de Viagem*. Universidade de Brasília – UnB, Brasília, DF.

PIOVESAN, A. (1970). *Percepção cultural dos fatos sociais: suas implicações no campo da saúde pública*. Rev. Saúde Pública, 4: 85-97, 1970.

PORTUGAL, L. S. Y GOLDNER, L. G. (2003). *Estudo de pólos geradores de tráfego e de seus impactos nos sistemas viários e de transportes*. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Edgard Blücher LTDA, 322p.

PORTUGAL, L. S. (2012). *Polos Geradores de Viagens Orientados à qualidade de vida e ambiental: modelos e taxas de geração de viagens*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência.

43 El tráfico generado por proyectos inmobiliarios en la ciudad de Lima

Félix Israel Cabrera Vega

Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú

RESUMEN

Los estudios de impacto vial se realizan frecuentemente con la finalidad de determinar el efecto del tráfico generado por un proyecto en la circulación vehicular. En el caso de Lima, una gran parte de los proyectos desarrollados en los últimos años, son conjuntos residenciales, y su tráfico generado se ha determinado sólo de acuerdo al criterio de los profesionales o del evaluador público correspondiente, lo que ha derivado comúnmente, en un valor subestimado o sobre dimensionado. Por ello, se realiza la evaluación de esta situación mediante la realización de encuestas a algunos profesionales del medio y se aplican las recomendaciones del Institute of Transportation Engineers (ITE) para obtener, mediante regresión, una expresión que relacione el tráfico generado con una variable medible e independiente.

Los resultados indican que en Lima, se emplean 4 formas de estimar el tráfico generado. Además, su valor depende del día de la semana, siendo mayor los días lunes y viernes. En general, el tráfico generado variaría desde un 25% hasta un 35% del número de estacionamientos del proyecto y sería posible relacionar ambos parámetros linealmente. También, se observó que el tráfico generado algunas veces se encontraría sobre dimensionado y en otras subestimado. Finalmente, sería recomendable ampliar el número de proyectos evaluados para tener una muestra mayor que permita obtener conclusiones adicionales.

Palabras Claves: estudios de impacto vial, tráfico generado, proyectos residenciales

1. INTRODUCCIÓN

Los estudios de impacto vial (EIV) se caracterizan, principalmente, por evaluar el efecto de los nuevos viajes que genera un proyecto sobre un área de influencia. Por ejemplo, se busca evaluar si el tráfico generado por un conjunto residencial impactará negativamente en las intersecciones o en las vías adyacentes; y si este es el caso, se plantearán medidas de mitigación, como rediseños viales, ampliación de los carriles de circulación y cambios en los tiempos de los semáforos, para incrementar la capacidad de las vías (Robertson et al., 1994).

Una de las partes más importantes de los estudios de impacto vial (EIV) es la modelación

del tráfico, que se realiza en tres escenarios: uno actual (sin proyecto), otro futuro con tráfico generado (conocido como “Do Nothing”) y el último con tráfico generado y medidas de mitigación. Posteriormente, sus resultados se comparan mediante parámetros de eficiencia como el grado de saturación, el nivel de servicio y las longitudes de colas.

Para poder realizar la modelación de estos escenarios es fundamental establecer la magnitud del tráfico generado, el cual depende principalmente de las condiciones locales. En el caso de Lima, el tráfico generado por los diferentes tipos de proyectos se ha determinado sólo de acuerdo al criterio de los profesionales o del evaluador público correspondiente, lo que ha derivado comúnmente, en cantidades que podrían estar fuera del orden de magnitud de los valores reales.

Por ello, en este estudio se realiza la evaluación de esta situación y se consideran las recomendaciones del “Trip Generation” (ITE, 2012) para determinar una expresión local que permita estimar el tráfico generado por los proyectos residenciales.

1.1 Objetivos

Evaluar la forma en que se determina actualmente el tráfico generado por proyectos inmobiliarios en la ciudad de Lima y aplicar las recomendaciones del Institute of Transportation Engineers para obtener mediante regresión, una expresión que relacione el tráfico generado con una variable medible e independiente

2. EL TRÁFICO GENERADO

El tráfico generado se define como los viajes vehiculares adicionales que resultan de la implementación de un proyecto o mejora del transporte (Litman, 2001; Jovic y Depolo, 2011). En el caso de un conjunto residencial, éste puede estar conformado por los viajes producidos y atraídos que se relacionan con las variables socioeconómicas de los futuros residentes. Entre las principales variables se encuentran el ingreso familiar, la propiedad vehicular y el acceso al sistema de transporte público de la ciudad (Quintero et al., 2008).

Además, en algunas circunstancias, se considera que el tráfico generado no afectará a las condiciones actuales de circulación, por ejemplo, diversos manuales o reglamentos establecen que se requiere de un tráfico generado de al menos 100 veh/h para cambiar el nivel de servicio de una intersección (ITE, 2006; CALTRANS, 2002). Esto ha sido aceptado a nivel internacional, como en el caso de Chile donde se exonera del requisito de los EIV a los proyectos residenciales que tienen menos de 250 estacionamientos y pertenecen a los estudios tácticos sin reasignación (Ministerio de vivienda y Urbanismo, 2003).

Para determinar el tráfico generado es una práctica usual que, como primera opción, el responsable del estudio de impacto vial procure obtener información sobre proyectos similares realizados con anterioridad o en todo caso realice conteos en conjuntos

residenciales existentes del mismo tipo. Otra opción es emplear los ratios presentados en el manual “Trip Generation” (ITE, 2012). Sin embargo, estos ratios sólo representarían adecuadamente las tasas de motorización de los EEUU y no la de lugares como Lima.

Teniendo en cuenta lo anterior, sería conveniente determinar expresiones locales que permitan obtener el tráfico generado. Para ello, el manual “Trip Generation” (ITE, 2012) establece que las relaciones lineales y logarítmicas serían adecuadas para determinar el vínculo entre el tráfico generado (T) y una variable independiente (x), como la cantidad de estacionamientos, el área del proyecto, etc. Las Ecuaciones 1 y 2 muestran los tipos de expresiones propuestas por el Institute of Transportation Engineers.

$$T = a \cdot x + b \quad (1)$$

$$T = a \cdot \ln(x) + b \quad (2)$$

Las ecuaciones anteriores dependen además de las constantes a y b, pero para que sean válidas se debe cumplir con algunos requisitos adicionales que involucran al tamaño de la muestra (n), el coeficiente de correlación (R^2), la desviación estándar (σ) y la media de la muestra (M). Dichos requerimientos se muestran a continuación.

$$n > 3 \quad (3)$$

$$R^2 \geq 0.5 \quad (4)$$

$$\sigma \leq 110\% M \quad (5)$$

También, se indica que la variable independiente debe ser una variable física medible, predecible y que sea una causa directa de la variación del tráfico. Asimismo, debe ser de información primaria, es decir, se debe medir directamente y no ser un resultado derivado de otros análisis.

De existir varias variables que puedan ser seleccionadas como independientes, se debe seguir el siguiente proceso. En primer lugar, se deben seleccionar aquellas que cumplan con lo establecido en las Ecuaciones 3, 4 y 5. En segundo lugar, se prioriza a las que se puedan cuantificar con mayor exactitud y finalmente, a las que tengan un tamaño de muestra mayor. Además, es importante la selección de los lugares de estudio. Se indica que las características del lugar se deben mantener a lo largo del estudio, que el proyecto residencial se encuentre ocupado al menos al 85% de su capacidad y que tenga al menos dos años de operación.

3. METODOLOGÍA

En este proyecto se trata de alcanzar los objetivos antes mencionados, mediante un trabajo de campo que involucra encuestas a 10 profesionales del medio y la medición del tráfico generado por proyectos inmobiliarios que cumplen con las recomendaciones del manual “Trip Generation”. También, en cada uno de ellos, se mide el tráfico generado en la hora punta de cada día laborable, de lunes a viernes, en el mes de junio del año 2015, y se establece un análisis de regresión que relaciona el tráfico generado con una variable independiente. El horario de aforo para tres proyectos fue de 8:00 a 9:00 horas y para el cuarto de 18:00 a 19:00 horas.

El tráfico generado en este proyecto abarca a los viajes motorizados de los residentes, ya sea en su auto particular o en otros tipos de vehículos como taxis, moto taxis y vehículos de servicio escolar.

Asimismo, en el análisis de regresión lineal, se consideran las recomendaciones del “Trip Generation” en cuanto al valor máximo de la desviación estándar y el mínimo coeficiente de correlación que se pueden obtener para que el estudio sea considerado válido. Además, se analizan como posibles variables independientes al número de estacionamientos, al número de departamentos (viviendas) y al área del proyecto.

Finalmente se compara el tráfico generado empleado en los estudios de impacto vial de dichos proyectos, con el tráfico generado obtenido con la expresión lineal determinada en esta investigación.

4. RESULTADOS

4.1 Opiniones

De las preguntas realizadas a algunos profesionales del medio, se determinó que la mayoría ha empleado comúnmente, 4 formas de estimar el tráfico generado. Sin embargo, al pedirles que indiquen el método que más han utilizado indicaron lo siguiente: información de estudios previos y proyecciones (20%), conteos en proyectos similares (10%), los ratios del manual “Trip Generation” (30%) y un porcentaje del número de estacionamientos (40%).

Estos resultados concuerdan con las observaciones realizadas en otros países sudamericanos (Quintero et al., 2008), y se comprueba que el número de estacionamientos es un factor directamente relacionado a la circulación vehicular. Esto último se puede encontrar oficializado en algunos reglamentos donde se indica que el flujo vehicular generado por un proyecto guardaría relación con el número de estacionamientos proyectados (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2003).

También se consultó sobre el porcentaje de los estacionamientos que se han empleado para determinar el tráfico generado. En este caso, se determinó que los porcentajes utilizados por cada profesional son muy variables, fluctuando entre el 25% y 100% del número de estacionamientos, lo que dependería de la magnitud del número de estacionamientos proyectados. En muchos casos, cuando se tienen alrededor de 100 estacionamientos, se ha considerado la totalidad de ellos como tráfico generado, mientras que a medida que el número de estacionamientos aumenta el porcentaje disminuye.

Además, se consultó si es necesario que la ordenanza, que regula los estudios de impacto vial, incorpore ratios fijos que permitan determinar el tráfico generado. En este caso, el 60% de los encuestados afirmó que no era necesario establecer cifras fijas, pero si algunos lineamientos, y un 40% sostuvo que sí era necesario. Asimismo, coincidentemente, la mayoría de los profesionales consideró que es necesario recolectar información histórica que permita definir ratios o ecuaciones para determinar el tráfico generado.

También el 80% de los encuestados afirmó que, al menos una vez, el tráfico generado que empleó en un estudio de impacto vial fue observado por el revisor correspondiente, quien solicitó ampliar este valor o realizar una explicación detallada del valor adoptado, lo que retrasó la aprobación de dichos estudios.

Finalmente se consultó si habría problemas derivados de una inapropiada estimación del tráfico generado. En este caso, se argumentó que tanto la subestimación como la sobreestimación originarían problemas en la circulación y en la movilidad de los diferentes usuarios de la ciudad. En el primer caso, podría considerarse escenarios con mejores niveles de servicio de lo real, con lo cual las medidas de mitigación podrían ser obviadas, mientras que, en el segundo caso, al considerarse un mayor tráfico generado, las medidas de mitigación podrían incluir el aumento de la infraestructura vehicular como carriles adicionales, lo que al aumentar la capacidad vial atraería un mayor tráfico generado en el futuro (Litman, 2001).

Otro aspecto a comentar es que en Lima se utilizan los parámetros del grado de saturación y los niveles de servicio para evaluar la calidad de la circulación vehicular, siendo los segundos muy sensibles a la determinación del tráfico generado y a sus medidas de mitigación asociadas. Empleando los niveles de servicio, existe la posibilidad de pensar que las medidas de mitigación han mejorado las condiciones actuales, aunque no haya habido mejoras tangibles en la circulación. Por ejemplo, en el caso de las intersecciones semaforizadas, si se tiene una demora promedio de 36 s/vehículo, el nivel de servicio sería D, y si con las medidas de mejora la demora es 34 s/vehículo, el nivel de servicio sería C (TRB, 2000), es decir, se podría pensar que se mejoró sustancialmente la calidad de la circulación, lo que no es acertado.

4.2 Análisis cuantitativo

Como se mencionó anteriormente, para determinar la expresión del tráfico generado, se realizaron conteos en cuatro proyectos residenciales que cuentan con más de dos años de funcionamiento y que cumplen con las sugerencias adicionales del Institute of Transportation Engineers. Estos proyectos se ubican en los distritos de Surco, Puente Piedra y Ate (Tabla 1).

Para cada uno de los conjuntos residenciales, se midieron los flujos vehiculares correspondientes al tráfico generado, durante 5 días de una semana, de lunes a viernes. La Figura 1 muestra la variación del tráfico generado aforado. En ella puede apreciarse que la mayor desviación estándar es producida en el proyecto (P1) que cuenta con la mayor cantidad de estacionamientos (352), aunque sea el que tiene la menor cantidad de viviendas (156).

Otro aspecto que resaltar es que el tráfico generado encontrado presenta variaciones de acuerdo al día de la semana. En general, se observa que, en cada proyecto, el mayor valor se produce el día lunes seguido del día viernes. En la Figura 2, se puede apreciar al tráfico generado, por proyecto, según el día y como porcentaje del número de estacionamientos. Para los proyectos 1, 3 y 4, habría un intervalo que varía desde el 25% al 35%, mientras que para el proyecto 2, el intervalo variaría desde el 34% hasta el 46%.

Tabla 1. Características de los proyectos analizados

| Descripción | Número de estacionamientos | Número de viviendas | Área (m ²) |
|-----------------|----------------------------|---------------------|------------------------|
| Proyecto 1 (P1) | 352 | 156 | 99878.26 |
| Proyecto 2 (P2) | 148 | 440 | 14410.28 |
| Proyecto 3 (P3) | 226 | 224 | 5980.88 |
| Proyecto 4 (P4) | 106 | 168 | 4403.99 |

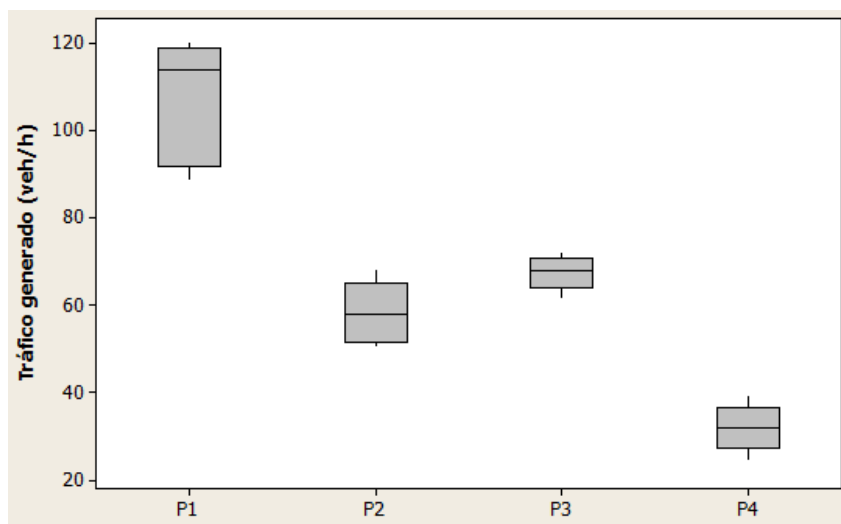


Figura 1. Variación del tráfico generado por proyecto

Este porcentaje del 46% reflejaría el hecho de que se considera también como tráfico generado los viajes que se producen por la presencia de moto taxis y otros vehículos motorizados que recogen residentes del condominio. Este proyecto tiene 440 viviendas y sólo 148 estacionamientos, por lo que una parte importante de los viajes se realizan mediante las moto taxis, el transporte público y la caminata. En este caso, pareciera que el tráfico generado no depende exactamente del número de estacionamientos, sino de una diversidad de factores, por lo que se reconoce que un estudio más extenso se debería desarrollar para conocer detalladamente las características de este tipo de casos.

En la Figura 3 se muestra la relación lineal que permite obtener el tráfico generado (T), en la hora punta de un día, a partir del número de estacionamientos (x) considerados en cada proyecto. La desviación estándar obtenida es menor al 110% de la media.

Debe destacarse que de los cuatro proyectos sólo uno tiene un número de estacionamientos mayor a 250, por lo que de acuerdo a la norma de algunos países, los 3 proyectos restantes no requerirían de estudio de impacto vial, al generar un tráfico menor a los 100 veh/h. La Figura 4 muestra el tráfico generado estimado con la relación lineal obtenida, y el tráfico generado considerado en los estudios de impacto vial correspondientes.

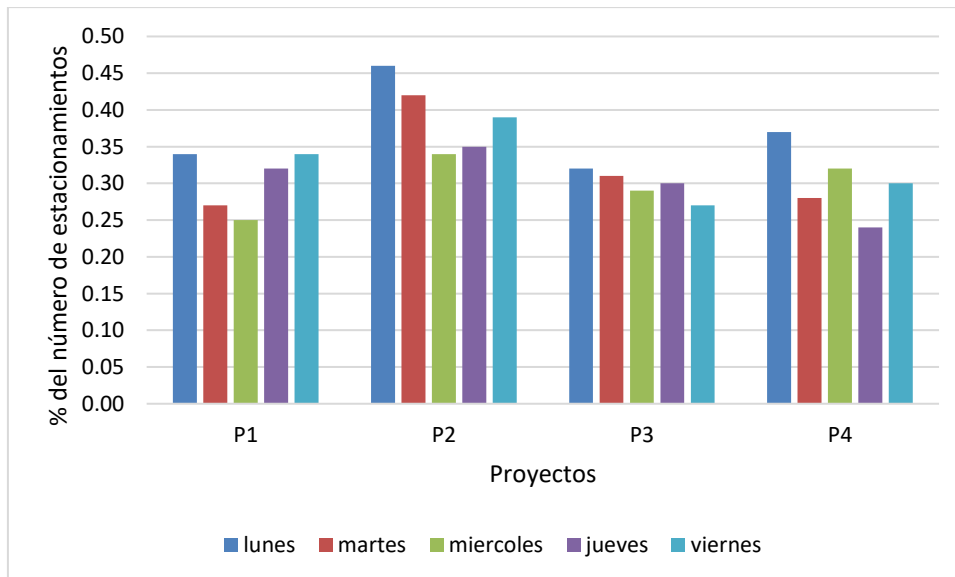


Figura 2. Tráfico generado como porcentaje del número de estacionamientos

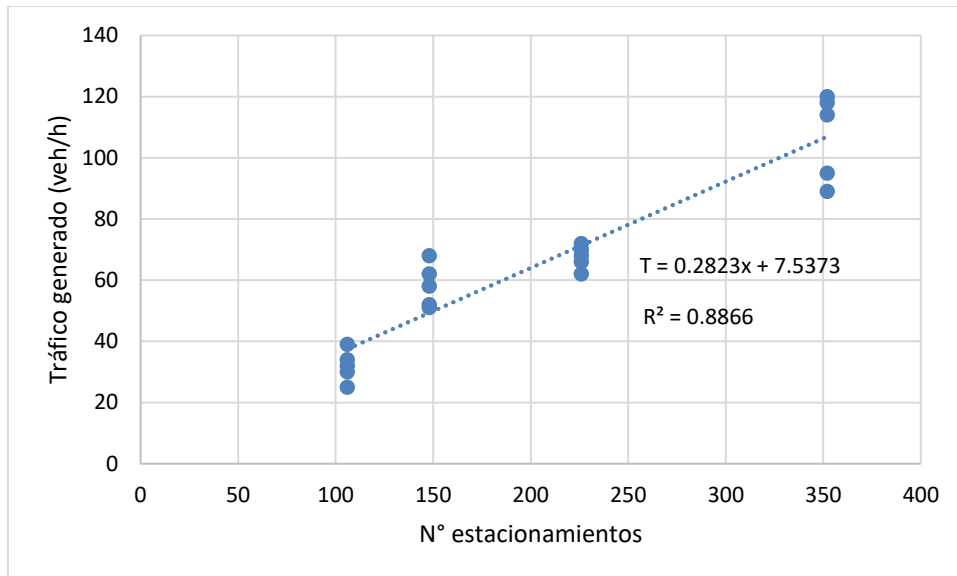


Figura 3. Relación lineal entre el tráfico generado y el número de estacionamientos

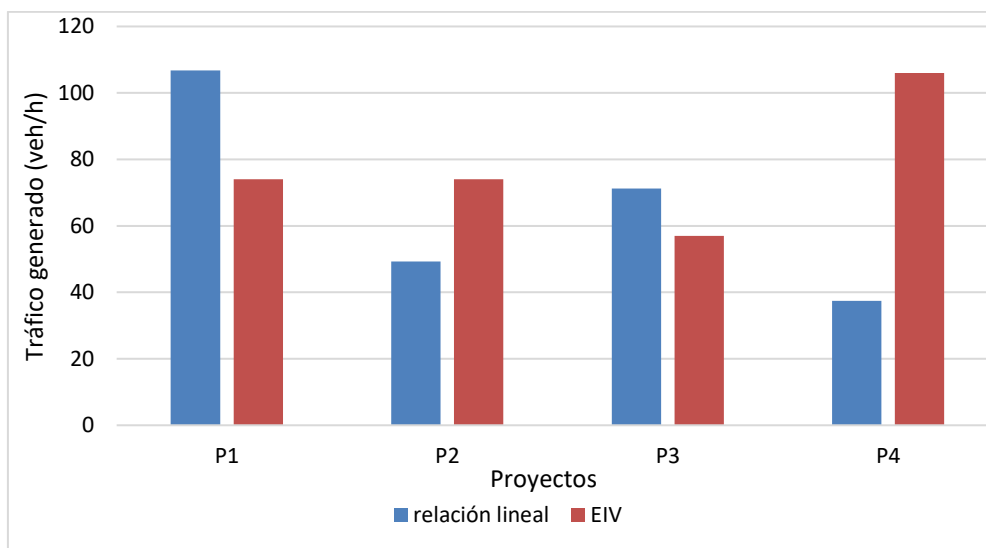


Figura 4. Tráficos generados con la relación lineal y los considerados en los EIV

Como puede observarse en la Figura 4 en los proyectos dos y cuatro se sobreestiman los valores del tráfico generado, mientras que en los proyectos uno y tres se subestiman. Sin embargo, en todos los casos, el tráfico generado sería como máximo alrededor de los 100 veh/h. A pesar de que los valores del tráfico generado para estos proyectos son bajos, se debe tomar con cuidado la decisión de exonerarlos de realizar un EIV, debido a que en algunos casos un porcentaje importante de viajes se realizarían en otro modo de transporte, lo que requeriría de medidas de gestión y rediseño del espacio público. Además, dependería de la calidad actual de la circulación en la zona de estudio, y finalmente, de si varios proyectos son desarrollados simultáneamente dentro de la misma cuadra de una calle o avenida.

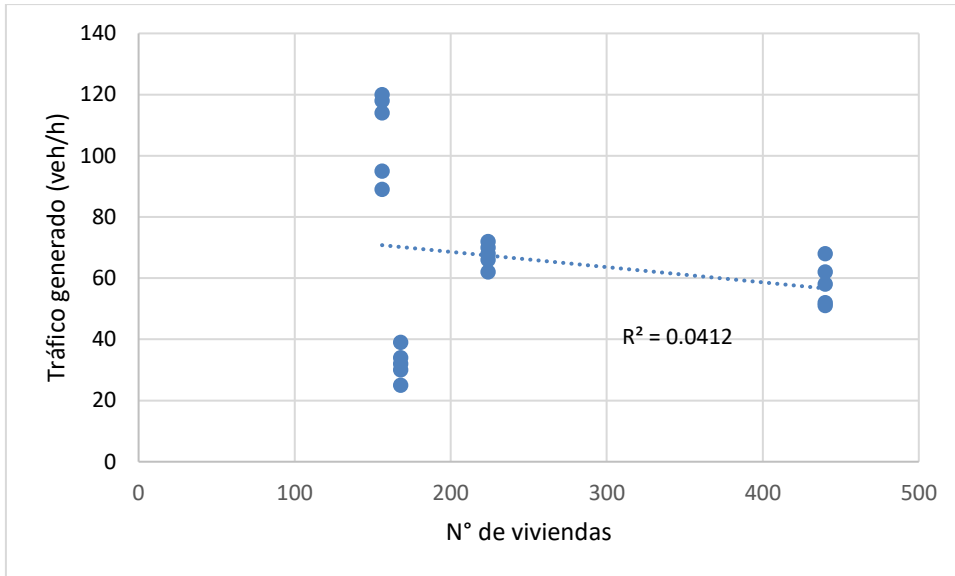


Figura 5. Relación lineal entre el tráfico generado y el número de viviendas

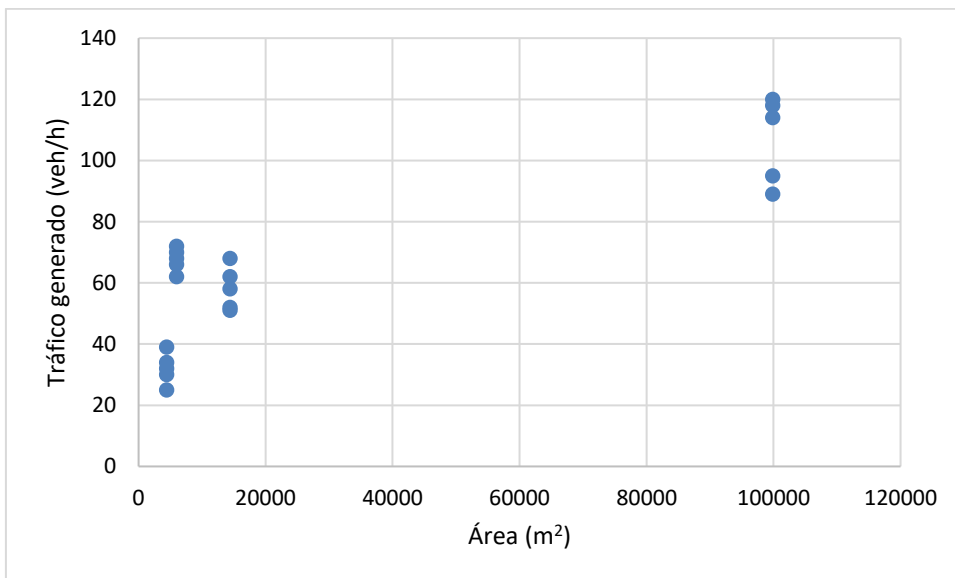


Figura 6. Relación entre el tráfico generado y el área del proyecto

Además, se analizó la posibilidad de estimar el tráfico generado a partir de otras variables independientes como el número de viviendas y el área de cada proyecto. En el caso del número de viviendas se encontró que no era posible emplear una relación lineal o de otro tipo; al asumir una relación lineal, el coeficiente de correlación R^2 era de 0.04, lo que indicaría falta de relación (Figura 5). Cuando se analizó el área de cada proyecto aparentemente, existiría una relación lineal (Figura 6); sin embargo, se observó una zona sin datos cuyo conocimiento es esencial para determinar adecuadamente el tipo de relación. Esto es un punto pendiente a analizar; pero, si esta relación fuese considerada como posibilidad, de acuerdo al manual “Trip Generation”, para ser empleada, debería brindar mejores resultados que la relación lineal obtenida con el número de estacionamientos.

5. CONCLUSIONES

Comúnmente en Lima, se emplearían cuatro formas de estimar el tráfico generado: mediante información de estudios previos y proyecciones (20%), conteos en proyectos similares (10%), los ratios del manual “Trip Generation” (30%) y un porcentaje del número de estacionamientos (40%). También, el 60% de los encuestados afirmó que no era necesario establecer cifras fijas de tráfico generado en las ordenanzas municipales, pero si algunos lineamientos, y un 40% sostuvo que sí era necesario. Asimismo, el 80% de los encuestados afirmó que, al menos una vez, el tráfico generado que empleó en un estudio de impacto vial fue observado por el revisor correspondiente. En estos, se solicitó ampliar este valor o brindar una explicación detallada del valor adoptado, lo que retrasó la aprobación de dichos estudios.

Del análisis cuantitativo se observó que, en cada proyecto, el tráfico generado sería variable y que el lunes se produciría el mayor valor, seguido del día viernes. Asimismo, el tráfico generado podría variar desde un 25% hasta un 35% del número de estacionamientos, con excepción del proyecto dos, donde varía desde un 34% hasta un 46%.

El proyecto que cuenta con 440 viviendas y sólo 148 estacionamientos (0.34 estacionamientos por vivienda) tendría un tráfico generado que correspondería a la presencia de moto taxis y otros vehículos motorizados que recogen residentes del condominio. En este caso, pareciera que el tráfico generado no depende exactamente del número de estacionamientos, sino de una diversidad de factores, por lo que se reconoce que un estudio más extenso se debería desarrollar para conocer más a fondo las características de este tipo de casos.

Fue posible determinar una relación lineal entre el tráfico generado y el número de estacionamientos; sin embargo, se resalta que la expresión sería válida para proyectos entre 106 y 352 estacionamientos y que el tráfico generado sería como máximo alrededor de los 100 veh/h. Además, las relaciones del tráfico generado con el número de viviendas y el área del proyecto no pudieron ser establecidas, al no obtenerse coeficientes de correlación R^2 adecuados y presentarse insuficiencia de datos, respectivamente.

También, se observó que el tráfico generado empleado en los estudios de impacto vial algunas veces se encuentra sobredimensionados y en otras subestimados, por lo que sería recomendable ampliar el número de proyectos evaluados para tener una muestra mayor que permita obtener conclusiones adicionales. Finalmente, sería necesario recolectar información histórica que permita definir ratios o ecuaciones locales.

REFERENCIAS

CALTRANS (2002). *Guide for the preparation of traffic impact studies*. Department of

Transportation California. California.

INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS, ITE (2006). *Transportation impact analyses for site development*. Washington, D.C.

INSTITUTE OF TRANSPORTATION ENGINEERS, ITE (2012). *Trip generation manual*. 9th edition, Vol. I. Washington, D.C.

JOVIC, J. Y DEPOLO, V. (2011). *The role of trip generation models in sustainable transportation planning in south-east Europ*. Transport, Vol. 26, issue 1, pp. 88-95.

LITMAN, T. (2001). *Generated traffic: implications for transport planning*. ITE Journal, April, PP. 38-47.

MINISTERIO DE VIVIENDA Y URBANISMO (2003). *Estudios de impacto sobre el sistema de transporte urbano- EISTU*. Santiago de Chile.

QUINTERO, A.; PALMAR, M.; ANDUEZA, P.; CASANOVA, L. Y DIAZ, M. (2008). *Evaluación de la experiencia obtenida en los estudios de impacto vial y propuestas para su ejecución y evaluación*. Revista Ciencia e Ingeniería, Vol. 29, No. 3, pp. 243-248.

ROBERTSON, H. D, HUMMER, J. E. Y NELSON, D. C. (1994). *Manual of transportation engineering studies*. Prentice Hall, New Jersey.

TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, TRB (2000). *Highway Capacity Manual 2000*. National Research Council. Washington D.C.

44 Geração de renda urbana, mobilidade e as metrópoles

Clóvis Garcez Magalhães

Luiz Afonso dos Santos Senna

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Brasil

RESUMO

O planejamento urbano das cidades impacta fortemente o valor adicionado à renda da terra urbana pelos modelos de acessibilidade física. A ocupação e uso do solo produz a especialização do território e como consequência, a segregação das populações que acabam morando em lugares distantes, com custos elevados de manutenção da vida na cidade. Desta forma, com base nos modelos de micro e macrolocalização e na Teoria Geral do Consumidor, o presente artigo aprofunda a análise sobre os efeitos da conectividade na geração de renda urbana dos usuários de transporte coletivo. O estudo de caso é a cidade de Porto Alegre (RS), Brasil. Com esse objetivo, foi realizada pesquisa de campo e foram aplicados questionários estruturados, de forma aleatória, em terminais de transporte coletivo na região central que atendem as linhas dos cinco eixos principais da cidade. Como parte da abordagem visava interpretar as influências da conectividade sobre duas condicionantes definidas, o planejamento da amostra considerou a população economicamente ativa (entre 16 e 65 anos) sem considerar seu vínculo empregatício no momento da pesquisa, apenas os valores de renda individual e familiar do entrevistado. Os resultados demonstram que as variações de Valor do Tempo no universo amostral, a partir da utilização da mobilidade virtual em meio urbano, são significativas a ponto de impactar os cálculos de composição do Produto Interno Bruto das Cidades objeto desta investigação, uma vez que na situação aplicada seu PIB é fortemente lastreado no setor de serviços, e que os fatores humanos da aglomeração podem ser determinantes para o desenvolvimento sustentável da cidade.

Palavras Chave: Mobilidade Urbana, Conectividade, Ocupação e Uso do Solo

1. INTRODUÇÃO

A lógica de composição do Produto Interno Bruto das cidades, como indicador econômico, tem forte influência dos efeitos produzidos pela incidência predominante do setor de serviços, abastecimento e consumo e das condições geográficas de aglomeração. Nesta condição, considerando o tempo gasto em deslocamentos, observar a acessibilidade e a mobilidade como elementos fundamentais para sua interpretação é condição determinante na realização e projeção do desenvolvimento urbano sustentável.

São as cidades o *locus* de interação entre o território, as pessoas e as atividades. Nosso objetivo é analisar as possibilidades de produção de renda a partir da redução de

externalidades como a distância, na economia dos moradores de um determinado sítio urbano, no caso específico, na cidade de Porto Alegre (RS).

Para medir os impactos produzidos na renda dos usuários do sistema urbano mais especificamente, o campo analítico deste artigo está alocado nos passageiros de transporte coletivo, visando obter uma *proxi* de renda e distância percorrida e as utilidades percebidas de redução do tempo ao longo do dia/semana pela utilização da mobilidade virtual.

Assim, a condição de PIB urbano, enquanto indicador econométrico de mercado, é interpretado sob a ótica da renda per capita de seus habitantes e a perspectiva do produto interno considerada a partir da relação entre a geração de renda total e sua população permanente.

Nossa proposta considera que a geração de renda pressupõe deslocamentos “físicos” e “virtuais”, uma vez que as atividades estão situadas em “algum ponto geográfico distante – *fora de casa*”. Esta condição e as possibilidades de um novo padrão de conectividade transformam os elementos básicos de planejamento urbano e admitem uma nova relação entre os fatores que configuram tempo e espaço. Compreender a cidade a partir da condição de fluxos resultantes da mudança desta relação (tempo/espaço) é o que projeta uma nova formação de renda marginal (não econômica para efeitos de PIB). Esta economia alavancada na plataforma de relacionamento virtual de pessoas e atividades, como formulado por Castells (1989), interfere nas condições de valor do uso e ocupação do “*Espaço Físico*” e intensifica a interatividade através do “*Espaço de Fluxos*” capazes de apropriar novos modos de realização da vida urbana.

Por fim, a possibilidade de geração de renda per capita a partir da substituição do uso da rede física de acessibilidade pelo incremento do uso de plataformas digitais na realização de atividades “a distância”, define essa proposição reflexiva, analisando o potencial de geração de renda marginal, percebida no Valor do Tempo, como parcela intangível ao PIB das cidades, mas sensível a percepção e apropriação do espaço da metrópole pelos usuários do sistema urbano. Isto a partir da redução da utilização do meio físico e o incremento da mobilidade virtual com o uso de computadores, tablets e celulares.

2. PRESSUPOSTOS DO ESTUDO

Os pressupostos do trabalho situam-se na perspectiva de interpretar a conectividade como parte determinante do planejamento das cidades e, mais especificamente ao Planejamento dos Transportes, uma vez que diretamente relacionado aos critérios de acessibilidade e mobilidade. Neste contexto, a acessibilidade é interpretada como condicionante do espaço-suporte refletido na distancia, e a mobilidade como tempo de acesso na realização de atividades cujo efeito sobre as pessoas, o território e o meio ambiente, produzem renda. Essa renda, fortemente impactante nos mercados, é fator influente na formação do PIB das

idades. Nesta condição de geração de renda, seu efeito está relacionado à área geográfica ocupada pela aglomeração urbana e sua dimensão enquanto metrópole e/ou megacidade.

Assim, pode-se afirmar ser o fator econômico “tempo” o principal recurso não renovável e, desta forma, ser notório que o tempo perdido no transporte configura-se como um desperdício. Nesta perspectiva, ao pensar o tempo livre como categoria econômica, produz-se uma visão centrada no resultado final, na qualidade de vida dos agentes econômicos. O que significa valorar tanto o tempo que não é diretamente contratado pelo empregador, - e que as empresas consideram gratuito pois não lhes custa – como o tempo dedicado a atividades socialmente úteis mas que não entram no circuito monetário, como cuidados com a família, atividades lúdicas e comunitárias, “... e assim por diante, porque o prazer da vida tem valor. Dormir bem também tem valor. É o nosso tempo” (Dowbor, 2010)

De acordo com as pesquisas do movimento Nossa São Paulo (IBOPE Inteligência/Fecomercio SP, 2010), o paulistano ativo médio perdia por dia duas horas e quarenta minutos no trânsito. Este custo-tempo de 52,8 milhões de reais por dia, considerando-se a relação PIB/população permanente, é o que representaria a dimensão do prejuízo causado à cidade pela ineficácia das suas opções de transporte.

Nesta condição da relação custo-tempo, este trabalho observa os atributos como: a) renda produzida – entendida como grau de satisfação obtido, b) o custo do deslocamento; e, c) o tempo necessário para a obtenção do resultado pretendido, para analisar os efeitos da conectividade e da mobilidade virtual na produção de renda marginal gerada aos usuários do sistema urbano.

O projeto de pesquisa tomou como base de interpretação os modelos econômicos de localização intra-urbana, a partir de critérios de acessibilidade, como parte da decisão de inserção dos indivíduos dentro da cidade. Estes modelos econométricos, baseados na acessibilidade física aos centros geradores de interesse e consumo, identificam os valores de macro e microlocalização para definir os efeitos sobre a renda média dos usuários do sistema, observando a relação entre valor da terra e a concepção de espaço-suporte (estrutura de acesso).

Como condição para a tomada de decisão dos usuários, os modelos “microlocaçionais” assumem que o desejo de maior acesso físico condicionam a renda, uma vez que a possibilidade de acessibilidade máxima produz a elevação da renda da terra e, como o orçamento é limitado, acabam por reduzir a disponibilidade de aquisição de outros bens de satisfação e conforto. Sob premissas “microlocaçionais”, para maximizar a satisfação, o consumidor “sustitui” a condição de acesso por outros quesitos de consumo, de forma a alcançar o seu nível ótimo. Sob a mesma condição, da máxima acessibilidade, os “macrolocaçionais” propõem a lógica de distribuição da atividade “moradia” em função de localização derivada das oportunidades de emprego (“proxy” da renda). Nos

macrolocacionais, a geração de proximidades minimiza os gastos com transporte e a decisão do consumidor não relaciona-se aos atributos pessoais, mas para a “distância percorrida” até a atividade relacionada (renda produzida).

Por fim, duas são as premissas deste estudo para a interpretação dos efeitos da conectividade no processo de formação da renda urbana e na composição do PIB das cidades:

- As distâncias urbanas, como requisitos de escoamento de produtos e serviços, inclusive pessoas (acessibilidade); e,
- O adensamento populacional, para a geração de escala e consumo, inclusive o tempo relacionado as atividades (mobilidade).

Portanto, para decidir a localização intra-urbana, o *trade-off* da decisão situa-se entre estes dois atributos: acessibilidade física (distancia) e localização (renda da terra). Assim, como a decisão de viajar é motivada, e a renda produzida pela atividade desejada admite um outro conjunto de valores, nosso propósito é avaliar os efeitos da conectividade e superação da variável “distância” no cálculo do valor do tempo dos usuários de transporte coletivo de Porto Alegre/RS. Para evidenciar o processo de evolução das áreas urbanas a partir da condição de produção no espaço-suporte (acessibilidade) das cidades e o incremento de distâncias e adensamento urbano, formatamos um quadro síntese observando os efeitos dos diferentes ciclos econômicos e o território das cidades.

Os Modelos de Desenvolvimento Econômico e as Formas de Acessibilidade Urbana

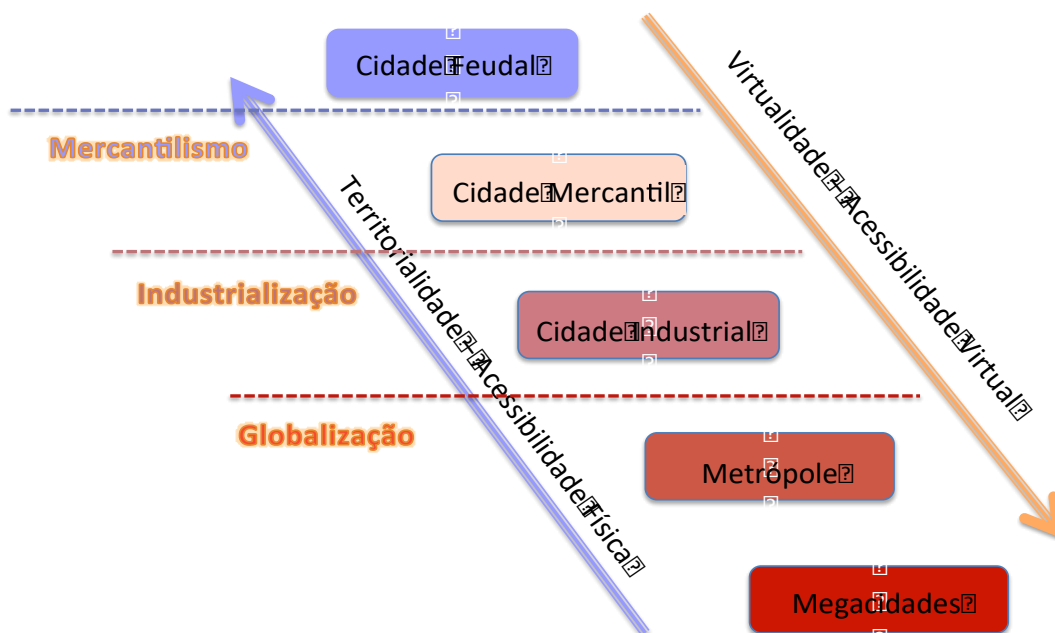


Figura 1. Ciclo de Expansão das Cidades, do acesso físico-territorial à conectividade virtual

Fonte: Autores

3. FORMULAÇÃO DA SITUAÇÃO PROBLEMA

Como parte da problematização da situação investigada, o objetivo é analisar os reflexos da mobilidade virtual e suas possibilidades no comportamento dos usuários do sistema de transporte coletivo da Porto Alegre –RS, Brasil; consideramos os três elementos básicos para a formalização da “Cultura da Mobilidade”.

- *Os usuários*, enquanto indivíduos ou grupos de pessoas que usam e usufruem dos modos de circulação das cidades, cujos valores, convenções e práticas são determinantes na solução dos problemas de mobilidade;
- *Os gestores estratégicos*, planejadores do espaço urbano, construtores, desenvolvedores de soluções e formuladores de políticas públicas de transporte, cuja ação determina o conjunto de iniciativas que viabiliza a circulação de pessoas, bens e mercadorias; e
- *A infraestrutura física e tecnológica*, aplicada aos produtos e serviços que formatam os sistemas de transportes e nos quais estão assentadas as condições de mobilidade das cidades.



Figura 2. Visão Sistêmica da Utilização do Espaço Urbano e o incremento da virtualidade

Fonte: Autores

O ciclo de iterações para o entendimento deste estudo parte dos elementos que formalizam a “cultura da mobilidade” - fator demográfico, expansão urbana, motorização-acessibilidade e os novos modos de mobilidade virtual.

A pesquisa investiga a consistência, a sensibilidade e o grau de influência nos usuários para a conectividade (uso da internet) nas atividades urbanas e seus reflexos de renda (valor do tempo) destes indivíduos.

Partindo-se da visão apresentada na Figura 2, observamos que o ciclo de expansão dos territórios urbanos e os modelos de transporte e circulação são fatores determinantes no consumo de tempo e renda dos usuários do sistema urbano, produzem deseconomias sistêmicas e geram impactos na formação do PIB das cidades. Neste cenário, as possibilidades de aplicação de tecnologias virtuais e portabilidade (mobilidade virtual e mista) possibilitam um processo de redução dos custos de deslocamento e incrementam a renda marginal dos moradores, aumentando os níveis de consumo e serviços produzidos no ambiente urbano. Assim, com base na “Cultura da Mobilidade”, caberá aos gestores estratégicos e aos decisores, com o incremento das condições de infraestrutura e tecnologia, o enfrentamento da situação-problema proposta neste artigo.

4. PREMISSAS DE CIRCULAÇÃO E TRANSPORTES NA FORMAÇÃO DA RENDA URBANA

Duas são as premissas que permitem determinar o processo de produção das cidades

- O escoamento de produtos e serviços – “acessibilidade”
- O adensamento para geração de escala e consumo – “mobilidade”

4.1 O processo de escoamento dos produtos e serviços

Como parte dos processos econômicos de geração de emprego e renda, o fenômeno urbano é constituído pela relação circulante de pessoas, atividades e produtos. Sendo um processo de acesso aos meios de produção e consumo, o primeiro elemento gerador de renda pode ser definido como: “distância” ou a extensão geográfica a ser percorrida na realização de determinados objetivos e/ou atividades no espaço das cidades. Esta condição preliminar, como elemento definidor da formação da renda urbana, é segregador da riqueza produzida pelo adensamento urbano, uma vez reconhecido o valor de renda de terra.

Neste sentido, a condição de acessibilidade é o fator de desequilíbrio e a segregação configura o desenho urbano, distanciando as populações de menor renda e produzindo crescentes deseconomias sistêmicas – expansão dos centros periféricos, das cidades-dormitório e expansão desordenada das Metrôpoles.

Assim, o incremento de acessibilidade produzido pela ocupação industrial dos territórios

marginais e a geração de pólos de atração de viagens nas periferias urbanas, além de promoverem o escoamento da produção, são intensivos em mão-de-obra, o que acaba por reduzir as condições de circulação. Este ciclo de expansão apresenta duas características diretamente relacionadas ao escoamento de produtos:

- a) aumenta os congestionamentos na malha viária urbana: e,
- b) produz um crescimento desordenado das áreas periféricas das regiões metropolitanas, aumentando o tempo de circulação e acesso aos meios de produção da cidade.

4.2 O processo de adensamento, geração de escala e consumo

A segunda premissa do processo de formação do produto interno bruto das cidades está projetada na capacidade de geração de escala e consumo. Neste cenário de adensamento populacional, a geração de valor está diretamente relacionada à localização geográfica, à setorialização de atividades e aos modelos de transporte que abastecem estes locais. Com o esgotamento do uso do espaço viário e os constantes congestionamentos nos centros urbanos consolidados, são frequentes os desequilíbrios que acabam por reduzir e/ou deprimir economicamente estes centros, dificultando a ocupação habitacional que desloca-se para áreas periféricas na perspectiva de uma convivência harmônica entre as pessoas, as comunidades e o meio ambiente.

Neste sentido, a condição de mobilidade virtual constitui-se como elemento fundamental desta equação de ocupação das áreas centrais dos aglomerados urbanos, uma vez que, desenhados para a circulação predominante de automóveis, os espaços viários esgotam sua capacidade de circulação e, embora acessíveis, não oferecem mobilidade, sendo mais rápida a circulação a pé ou de bicicleta do que em veículos automotores.

4.3 O valor do tempo de viagem nos deslocamentos urbanos – base teórica

Segundo Jara-Díaz et al., (2000), as teorias de alocação do tempo objetivam oferecer ferramentas capazes de avaliar o tempo de diferentes modos. Para tal, muitos conceitos foram produzidos, dependendo do período de observação, visando:

- o tempo como um recurso valioso;
- como algo passível de uma realocação (escolha); e,
- como alguma coisa que pode ser economizada (reduzida no uso).

Sendo um recurso finito e não estocável, o valor do tempo ao consumidor é orientado para satisfazer necessidades ou promover tempos de lazer e/ou ócio, limitado por uma renda.

Quando considerado nos modelos comportamentais do consumidor, sua alocação deve observar três importantes aspectos:

- seu papel na função utilidade;

- a necessidade de incluir uma restrição de tempo; e,
- a necessidade de identificar a relação entre tempo alocado e consumo de bens e produtos.

Oort (1969) mencionou que o tempo de viagem deveria ser incluído na função utilidade como um termo do SVTT (subjective value of travel time), especialmente, o valor da percepção direta do tempo de viagem na utilidade. Desta forma, uma redução mínima no tempo de viagem necessário, segundo as observações de Oort (1969), produziriam um efeito igual ao valor do tempo livre (lazer-ócio) menos o valor monetário do tempo de viagem na função utilidade. O corolário principal de Oort é: “o valor de uma redução no tempo de viagem deveria ser igual à taxa de renda somente se tanto o trabalho como a viagem não afetam diretamente a utilidade”.

DeSerpa (1971) desenvolveu uma função utilidade dependente em todos os produtos e períodos de tempo, que chamou de atividades, incluindo o trabalho e a viagem.

Nesta abordagem, as restrições técnicas estabeleciam o consumo de qualquer produto como requerente de uma alocação de tempo, permitindo interpretar-se o valor do tempo a partir de três conceitos elementares.

- o valor do tempo como um recurso, no qual é o valor da extensão do período de tempo equivalente a razão entre a utilidade marginal do tempo (total) e a utilidade marginal da renda.
- é o valor do tempo alocado a certa atividade, valor do tempo como insumo, dado como a taxa de substituição entre atividade e custo (moeda) na função utilidade U , a qual é igual a situação anterior, se o indivíduo gasta mais tempo do que o mínimo necessário na realização da atividade.
- é o valor do tempo economizado na atividade. Ele apresenta como a diferença algébrica entre o valor do tempo alocado para um uso alternativo, como um recurso, e o valor do tempo internalizado na atividade, como um insumo.

Considerando o valor do tempo e sua condição na geração de renda aos usuários do sistema urbano, os modelos de mobilidade estruturam o consumo de tempo correlacionando-o com a renda percebida pelo consumidor.

Assim, tem-se a formulação matemática do valor médio do tempo como um somatório de intervalos temporais que pode ser descrita a partir da alocação nas atividades em que é aplicado, podendo classificá-lo como: o tempo orientado às atividades produtoras de renda - *tempo produtivo* T_p (cujo valor está associado à renda X_p); e os tempos consumidos em outras atividades complementares à formação da renda, nas tarefas domésticas, nas relações comunitárias - *tempo reprodutivo* T_r , ou *tempos de lazer ou ócio* - T_L .

Considerando o tempo como recurso finito, no qual o seu consumo é restrito, pode-se

formular a equação do tempo total de um indivíduo como o somatório destas frações (intervalos) dos tempos.

$$T_T = T_P + (\alpha)T_R + (\beta)T_L, (1)$$

onde: T_T equivalente ao intervalo de um dia (24 horas); (α) aplicável para interpretação de diferenças comportamentais de gênero; e, (β) , aplicável às diferenças comportamentais de ordem da classe social, instrução e comunitária.

Sendo um somatório de intervalos de tempos aplicados a um interesse ou atividade e, considerando que essas atividades pressupõem um deslocamento para fora de casa, deve-se acrescentar, na equação geral do tempo, uma parcela exclusiva ao *tempo de viagem ou tempo consumido em deslocamento* – T_D . Assim, temos:

$$T_T = T_P + (\alpha)T_R + (\beta)T_L + T_D. (2)$$

Sendo o tempo um dos atributos de geração da renda, pode-se admitir que para cada fração de tempo despendido há a produção de uma renda equivalente. A equação da renda total, então, pode ser expressa como:

$$X_T = X_P + X_R + X_L - CD (3)$$

onde: CD é o valor de custo a ser deduzido da renda total, uma vez que é necessário consumir tempo e moeda nos deslocamentos.

O valor médio dos intervalos de tempo, considerando que a quantidade T_T é limitada, pode ser dado como:

$$VT_{\text{médio}} = X_T/T_T, \text{ ou } VT_{\text{médio}} = X_P + X_{mR} + X_{mL} - CD / T_P + T_R + T_L + T_D (4)$$

Para analisar as hipóteses de variação do valor médio do tempo de um usuário urbano a partir dos deslocamentos virtuais, considera-se a simplificação da equação (4), com a exclusão dos tempos – T_R e T_L , resultando:

$$VT_{\text{méd}} = (X_T - CD) / [T_P + (T_D - \Delta TD)] (5)$$

Aplicando-se variações do tempo de viagem (ΔTD), produz-se reflexos sobre o valor médio do tempo, na medida em que reduzem as duas variáveis que contribuem para o custo de deslocamento, reduzindo também o divisor da equação, podendo resultar em um valor de renda marginal X_{mD} , que se adiciona à renda total pela redução do custo e do tempo de viagem. Dessa forma, tem-se:

$$VT_{\text{méd}} = (X_T + X_{mD} - CD) / [T_P + (T_D - \Delta TD)] (6).$$

5. METODOLOGIA DA PESQUISA

A metodologia adota neste estudo consistiu na aplicação de questionário estruturado (anexo – formulários aplicados), tendo como universo pesquisado os usuários de transporte coletivo da Cidade de Porto Alegre/RS.

A amostra aleatória simples, composta de 200 entrevistados, selecionados dentro do universo amostral. A aleatoriedade da amostra foi garantida entrevistando-se um passageiro a cada cinco que desciam dos ônibus coletivos que chegavam aos terminais/paradas. Nos terminais com mais linhas entrevistou-se um passageiro a cada cinco que desciam seguindo imediatamente para uma próxima linha. Ao terminar as diferentes linhas que operavam no terminal, o entrevistador retornou para a primeira linha, procedendo sucessivamente desta forma até atingir o número de entrevistas previsto nas cotas amostrais (25 por terminal).

A população da amostra pesquisada contemplava homens e mulheres entre 18 e 65 anos, de diferentes classes sociais, economicamente ativos e inativos. A seleção e abordagem da amostra se deu aleatoriamente nos terminais enquanto os entrevistados aguardavam o veículo de transporte coletivo de seu interesse, tendo sido aplicadas duas perguntas filtro: a) residir em Porto Alegre e, b) ser usuário do transporte coletivo da cidade. As demais variáveis amostrais caíram na aleatoriedade da coleta.

A coleta foi realizada ao longo de dois dias úteis, no período entre às 07:30 hs e às 19:00 hs. Para a delimitação geográfica da área de coleta, foram escolhidos os terminais e pontos de ônibus que atendiam os cinco eixos de transporte coletivo, atendidos pelos quatro consórcios de ônibus que atendem a cidade: Unibus, Conorte, STS e Carris. Para cada eixo foram realizadas vinte e cinco entrevistas, totalizando 200 entrevistados. Os terminais selecionados para aplicação dos questionários foram definidos a partir da área de atendimento de cada eixo e tinham como principal objetivo obter dados relativos as diferentes populações e áreas geográficas que compõem o sitio urbano de Porto Alegre/RS.

A Figura 03 apresenta o mapa da cidade e as áreas pesquisadas, tendo como referencia os arcos amostrais que relacionam-se ao centro histórico e ponto de convergência de todas linhas.

Os terminais selecionados para a aplicação dos questionários são os seguintes: Eixo 1 - Região Central: terminal Rui Barbosa, localizado na Av. Borges de Medeiros, Terminal Loureiro da Silva, localizado na Av. Loureiro da Silva, Terminal Praça Parobé, localizado na Praça Parobé do Mercado Público de Porto Alegre, terminal Rui Barbosa, localizado na Praça Rui Barbosa, o terminal Salgado Filho, localizado na Av. Salgado filho. No eixo 2 – a coleta se deu ao longo da Av. Protásio Alves, nos seguintes pontos de ônibus: em frente ao SESC, Estação Três Figueiras, Estação Protásio Alves, Colégio Santa Inês, Colégio Israelita e Colégio Americano. No eixo 3 - a coleta dos dados foi realizada nos pontos de ônibus que

se encontram localizados ao longo da Av. Assis Brasil, a saber: Viaduto do Obirici; Centro Comercial Assis Brasil, Ponto do Hospital Cristo Redentor, Lindóia e no terminal Triângulo. No eixo 4 a coleta se deu ao longo da 3ª Perimetral e os pontos de ônibus incluídos nessa amostra foram: Estação Nilo Peçanha, Protásio Alves, Corag e São Luís (em frente ao supermercado Nacional). No eixo 5 a coleta foi realizada ao longo da Av. Bento Gonçalves nos seguintes pontos de ônibus: Estação PUC, Sanatório e Igreja São Jorge.

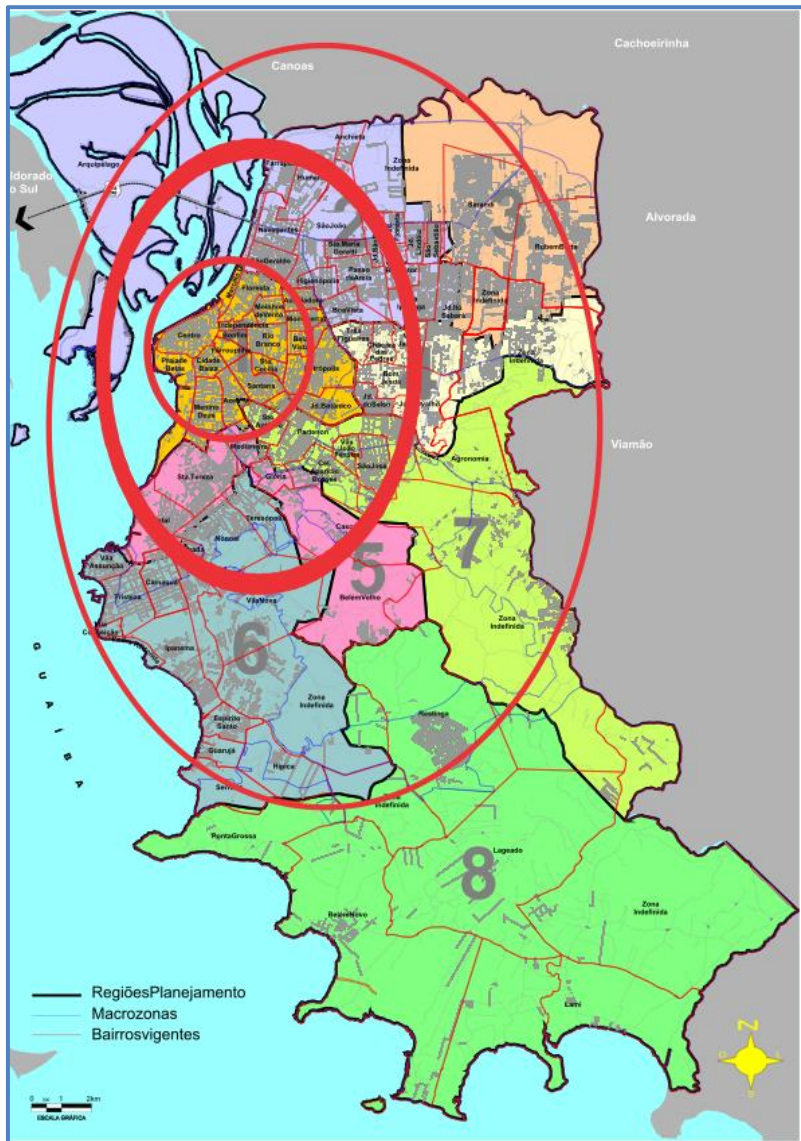


Figura 3. Mapa da cidade e as áreas pesquisadas

Fonte: Autores

5.1 Perfil dos usuários pesquisados

O perfil dos usuários está descrito no relatório da pesquisa, sendo que para os efeitos da análise e tratamento de dados foram utilizadas as respostas relativas as questões:

- 02 (frequência) –

| | |
|-------------|--------------|
| diariamente | 62.0% |
| 04 vezes | 7.5% |
| 03 vezes | 12.5% |
| > 03 vezes | 18.0% |
- 03 (gasto mensal com TC) - média = **R\$ 148.26;**
- 05 (tempo de trabalho) - média = **07hs 49 min;**
- 06 (tempo de estudo) – média = **04hs 13 min;**
- 07 (tempo livre) – média = **03hs 24 min;**
- 08 (tempo das lidas domesticas) – média = **02hs 56min;**
- 09 (tempo de deslocamento) – média = **01hs 27min;**
- 12 (conectividade) - internet = **56.2% (sim); 43.8% (não);**
celular = **55.5% (sim); 44.5% (não);**
- tempo percebido como redução de deslocamentos com o uso da conectividade – média = **02hs 06min;**
- gênero – **Feminino = 54%; Masculino = 46%;**
- Idade – média = **37.35 anos;**
- Renda Individual –

| | |
|------------------------------|-------|
| Até R\$ 1576.00 | 71.0% |
| De R\$ 1577.00 a R\$ 3940.00 | 22.2% |
| De R\$ 3941.00 a R\$ 7880.00 | 5.7% |
| Acima de 15000.00 | 0.5% |

5.2 Tratamento dos dados pesquisados e observações relevantes da pesquisa

Para a obtenção dos resultados amostrais realizamos um tratamento dos dados pesquisados, buscando retratar de forma objetiva as respostas oferecidas pelos entrevistados. Como parte da metodologia aplicada, as respostas correspondem exclusivamente à sensibilidade do entrevistado frente ao conjunto de quesitos oferecidos pelo entrevistador. A partir do banco de dados, trabalhamos com os tempos declarados para compor a equação do valor médio do tempo.

$$VT_{\text{médio}} = (X_T + X_{mD} - C_D) / [T_P + (T_D - \Delta T_D)]$$

Aplicando-se inicialmente os valores dos tempos declarados pelos pesquisados sem considerar o uso da internet, portanto, quando o indivíduo reporta-se ao *modus operandi* habitual, e numa segunda rodada, considera-se os valores dos tempos ativos de cada indivíduo deduzido os tempos declarados de economia produzida pelo uso da conectividade.

Assim, obtem-se as variações de valor do tempo para cada indivíduo pesquisado, tanto como a média refletida no Valor do Tempo Médio da amostra, segundo o gênero e a renda dos entrevistados. Os quadros a seguir apresentam a síntese dos valores obtidos pela pesquisa. Por fim, comparando-se os ganhos marginais na renda dos pesquisados e o valor de renda per capita no município de Porto Alegre/RS, podemos concluir que a utilização da mobilidade virtual como política pública de transporte é fator determinante para o desenvolvimento urbano sustentável.

Tabela 1. Valores de distribuição do tempo, segundo o gênero

| | Feminino | Masculino | Total |
|----------------|-----------------|------------------|--------------|
| Tempo trabalho | 5.63 | 6.65 | 6.10 |
| Tempo estudo | 0.84 | 1.22 | 1.02 |
| Tempo livre | 2.52 | 3.67 | 3.05 |
| Lida da casa | 3.28 | 1.68 | 2.55 |
| Deslocamiento | 1.50 | 1.48 | 1.49 |

Tabela 2. Sensibilidade para o uso da conectividade por gênero

| | Porcentagem |
|------------------|--------------------|
| Feminino | 42.0 |
| Masculino | 39.0 |
| Total | 41.0 |

Tabela 3. Tempo médio de atividade, custo-dia de deslocamento e renda média

| | Tempo atividades | Transporte Custo / Día (R\$) | Renda Média / Día (R\$) |
|------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|
| Feminino | 13.77 | 6.30 | 90.74 |
| Masculino | 14.72 | 5.78 | 91.26 |
| Total | 14.21 | 6.06 | 90.98 |

Tabela 4. Valor médio do tempo, Valor médio do tempo com conectividade e Valor adicionado (renda marginal)

| | VT Normal (R\$) | VT conectividade (R\$) | Valor adicionado (R\$) |
|------------------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Feminino | 6.40 | 7.41 | 1.01 |
| Masculino | 6.81 | 7.62 | 0.81 |
| Total | 6.59 | 7.51 | 0.92 |

Tabela 5. Setor determinante da formação do PIB da cidade, PIB per capita anual e PIB per capita hora

| | Produto Interno Bruto (R\$) |
|-------------------------------|------------------------------------|
| Agronegócio | 20,828,000.0 |
| Industria | 6,835,538,000.0 |
| Serviços | 36,160,987,000.0 |
| Total | 43,017,353,000.0 |
| População permanente | 1 476 867 |
| PIB per capita anual (R\$) | 29,127.44 |
| PIB per capita por hora (R\$) | 3.33 |

Tabela 6. Percentual de projeção do valor adicionado ao Valor do tempo médio e o PIB per capita – hora

| População permanente | | Valor adicionado ao VT | % do PIB/h |
|-----------------------------|------------------|-------------------------------|-------------------|
| Feminino | 791760 | 1.01 | 30% |
| Masculino | 685107 | 0.81 | 24% |
| Total | 1 476 867 | 0.92 | 28% |

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS A PARTIR DAS OBSERVAÇÕES INVESTIGAÇÕES

A seguir são apresentadas algumas considerações finais feitas a partir das investigações conduzidas no presente trabalho:

- i. Os modelos de cidades fundamentados na teoria da centralidade ou localização são especulativos e aumentam os custos de transporte com impacto negativo no orçamento geral (Produto Interno Bruto das Cidades) e, particularmente, nos usuários do sistema urbano.
- ii. Os modelos de acessibilidade, fundamentais no incremento do PIB, promovem um fenômeno de refuncionalidades dos espaços centrais (intensivas em na atração de pessoas)— com redução da mobilidade, reindustrialização na periferia requerendo maior acessibilidade, e deslocando as populações trabalhadoras em busca de melhor acesso aos locais de trabalho.
- iii. O centro urbano consolidado reorganiza-se economicamente, concentrando sua geração de valor nas atividades de serviço e consumo, intensivas em capital humano, com impactos à mobilidade urbana, e incrementa os custos de circulação e transporte.
- iv. Em contrapartida, a mobilidade virtual reduz o custo de transporte, e gera renda marginal aos usuários do sistema urbano, podendo produzir efeitos sobre a economia geral e incremento do Valor do Tempo Médio da população.

- v. A mobilidade, independente da condição de acesso físico, produz uma redução da formação de capital especulativo da terra, e realoca a “moradia” no espaço urbano, resgatando outros valores na condição de vida das populações urbanas (modelos comportamentais de localização).
- vi. A redução dos custos públicos de transporte, poluição e segurança pode reduzir a velocidade de expansão na formação de capital urbano especulativo, baseado na valorização da terra, e melhorar as condições de sustentabilidade e economicidade das cidades, gerando uma redução do custo de vida geral da população urbana.

REFERÊNCIAS

- CASTELLS. M. (1989). *The Informational City*. Blackwell Publishers.
- DESERPA, A.C. (1971). *A Theory of economics of Time*. The Economic Journal. Vol. 81, pp 828-846.
- DOWBOR. L. (2009). *O Valor econômico do Tempo Livre*. Democracia Econômica, Ed. Vozes, Petropolis, 2009.
- JARA-DIAZ. S ET AL. (2000). *The goods-activities transformation function in the time allocation theory*. 9th International Association for Travel Behaviour Conference, Gold Coast, Queensland, Australia.
- OORT, C.J. (1969). *The evaluation of travelling time*. Journal of Transport Economics and Policy. Vol. 3, pp 279-286

45 Análisis del impacto de los desarrollos habitacionales de Misión Vivienda en el sistema de transporte del Área Metropolitana de Caracas, Venezuela

Adarenis García Alarcón

Universidad Central de Venezuela, Venezuela

RESUMEN

Siendo la Gran Misión Vivienda Venezuela un programa de construcción de viviendas de interés social, que ha desarrollado 100 mil viviendas en la Región Metropolitana de Caracas en tres años, que esta región posee 5,000,000 de habitantes, donde el 65% de los viajes se realizan en un sistema de transporte público precario, operado sobre una vialidad congestionada que no satisface las demandas; surge la inquietud acerca del impacto que la ocupación de estos desarrollos puede tener sobre el sistema de transporte, así como las posibles mejoras en la movilidad de los habitantes de estos urbanismos, que estarán ubicados en zonas céntricas, con buena accesibilidad al transporte público.

Por ello se planteó el objetivo de analizar el impacto de los desarrollos habitacionales de Misión Vivienda en el sistema de transporte de la Región Metropolitana de Caracas (RMC). Para lograrlo se definieron los siguientes objetivos específicos: 1) Compilar las características de empleo, población, usos del suelo y el sistema de transporte para el año base; 2) Calibrar un modelo integral de usos del suelo y transporte para la RMC; 3) Desarrollar escenarios futuros con y sin Misión Vivienda y 4) Comparación y evaluación de los resultados.

La metodología se centró en el uso del “software” Tranus, mediante la creación de escenarios que permitiesen establecer comparaciones entre el funcionamiento del sistema de transporte con y sin nuevas viviendas.

La falta de planificación del sistema de transporte desincentivó la reducción de costos y tiempos de viaje, e incentivó el aumento del uso de la moto.

Palabras clave: Sistema de transporte, desarrollos orientados al transporte, accesibilidad, modelación integral de usos del suelo y transporte.

1. INTRODUCCIÓN

La Región Metropolitana de Caracas (RMC) está compuesta por 17 municipios distribuidos en tres entidades, con una población de 4,719,415 habitantes y ocupa un área aproximada de

4,316 km².

Por ser Caracas la capital del país, concentra la toma de decisiones públicas y privadas que afectan el comportamiento económico, social e institucional del país, además agrupa alrededor del 60% de los empleos del sector terciario superior y acoge las principales actividades financieras y terciarias del país (Modelistica, 2000).

Las principales actividades empleadoras y de servicios, se concentran en los 5 municipios que componen el Área Metropolitana de Caracas (AMC). Las zonas de Valles del Tuy, Altos Mirandinos, Vargas y el eje Guarenas-Guatire funcionan principalmente como ciudades dormitorio. Es decir, el AMC es un nodo atractor de viajes, que requiere la movilización de miles de habitantes hacia el Valle central. En la Figura 1 se puede observar el esquema de las zonas que conforman la RMC.

Actualmente las vías que conectan las ciudades dormitorios con el AMC poseen altos niveles de congestión, derivada de una desinversión en infraestructura vial de más de 30 años, Lizárraga (2012) expresa que “desde los años 70 y después de la construcción de la Cota Mil, no se ha invertido en grandes infraestructuras, ni se ha avanzado firmemente en una dirección alternativa al uso intensivo del vehículo privado”, sino que se ha incentivado con bajos precios de gasolina y estacionamiento; además existe una desorganización en la operación de transporte público superficial y falta de planificación de modos no motorizados de transporte. La congestión se intensifica por el tránsito de paso sobre las vías arteriales, provenientes del oriente y occidente del país, desfavorecida además por "las discontinuidades del sistema, los cambios de secciones transversales a lo largo de las vías y la incompatibilidad entre el diseño y la función de algunas de ellas que obstaculizan la fluidez del tránsito”, como bien lo explica Mundó (2012).



Figura 1. Conformación de la Región Metropolitana de Caracas (RMC)

La infraestructura vial de la región está diseñada principalmente para el uso del automóvil, y sin embargo, como explica Lizárraga (2012) “la estructura vial del AMC sólo está preparada para atender el 30% del parque automotor total”. Actualmente se adelantan varios proyectos para ampliar la capacidad del modo individual, existen pocas vías exclusivas para el transporte público, y en las que existen no se han incluido a los transportistas tradicionales, para una operación más eficiente y coordinada, lo que ha generado servicios paralelos que incrementan la congestión vial.

Por otra parte, desde el 2011 el gobierno venezolano ha venido construyendo edificaciones, en el marco de la Gran Misión Vivienda Venezuela (GMVV), en la que participan diversos organismos del estado, tales como Ministerio de la Vivienda, Metro, Petróleos de Venezuela, entre otros. Consiste en un esfuerzo por reducir el gran déficit habitacional acumulado. La meta del programa es de tres millones de viviendas para 2019, y hasta ahora se han logrado cerca de 1 millón, de las cuales más de 100 mil se ubicaron en la RMC.

Una proporción alta de las viviendas correspondieron a desarrollos relativamente pequeños, muchas veces sólo dos o tres edificios, en parcelas céntricas que estaban subutilizadas. No hubo un plan general, sino que los organismos procedieron con los recursos que tenían disponibles. El resultado es que una proporción importante de las viviendas fueron construidas o están siendo construidas en localizaciones de buena accesibilidad, bien servidas por los sistemas de transporte público. La mayoría de los habitantes de estos nuevos desarrollos procedieron de sectores periféricos informales, en condiciones físicas comprometidas e inseguras. El plan de vivienda GMVV les permite mejorar estas condiciones, no sólo físicas, sino también de accesibilidad.

Se trata de una política de remodelación urbana, de potenciar terrenos céntricos subutilizados, algo similar a lo que en la literatura se conoce como ‘Transit-oriented development (TOD)’. Entendiendo éste como un modelo de desarrollo enfocado en la proximidad y confianza en el transporte de masivo, que se caracteriza por favorecer medios de alta densidad, con mezclas de usos en las edificaciones y que promueve redes peatonales y ciclistas más conectadas y seguras (Bishop, 2015). Además, este modelo se caracteriza por concentrar el crecimiento urbano alrededor de corredores de transporte público, como es el caso de la ciudad de Copenhague en Dinamarca, lo que termina por maximizar el acceso al transporte público como lo describen Holmes y Hemert (2008).

Cabe destacar que la población asistida por la Misión Vivienda es de estrato socioeconómico bajo, cuyo principal modo de transporte es el transporte público. La demanda de este modo se incrementará e igualmente se crearán nuevas relaciones origen-destino, según la localización de los diferentes centros de servicios y equipamientos.

Esta intervención ha sido particularmente evidente en la RMC, un conglomerado de ciudades satélites alrededor de un valle central que alberga a casi 5 millones de personas. Un 40% del

área corresponde a desarrollos informales. En consecuencia, el impacto de un programa habitacional de la magnitud señalada es notable. El propósito de la investigación que aquí se reseña es el evaluar dicho impacto, tanto desde el punto de vista del transporte como de las condiciones de accesibilidad.

El impacto sobre el sistema de transporte es de particular interés, puesto que como se explicó anteriormente, la región presenta problemas de congestión vial importantes, a pesar de que los usuarios de automóvil son menos del 20%. La ciudad central cuenta con un metro de cuatro líneas que moviliza 2 millones de pasajeros diarios, y dos servicios ferroviarios suburbanos. Sin embargo, parte importante de las necesidades de movilidad de la población, se satisfacen con sistemas de transporte público superficial precarios.

La hipótesis central que esta investigación se propone someter a prueba es si la GMVV ha contribuido a mejorar la movilidad de la población. La reubicación de cantidades importantes de personas desde áreas remotas de difícil accesibilidad hacia localizaciones cercanas a los lugares de trabajo y bien provistas de transporte público, debe tener un efecto positivo sobre la movilidad e importantes efectos sobre la demanda del transporte público.

Es por lo anterior, que se planteó el objetivo de analizar el impacto de los desarrollos habitacionales de Misión Vivienda en el sistema de transporte de la Región Metropolitana de Caracas. Para lograr dicho objetivo, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

1. Compilar las características de empleo, población, usos del suelo y el sistema de transporte para el año base 2007 en la RMC.
2. Calibrar un modelo integral de usos del suelo y transporte para toda la RMC al año 2017 basado en el “software” TRANUS.
3. Desarrollar escenarios futuros con y sin Misión Vivienda para el año 2017.
4. Comparar y evaluar los resultados de usos del suelo y transporte.

Se consideró que el “software” Tranus (De la Barra, 1989) es el más adecuado para la modelación de este estudio, debido a que este permite introducir información tanto de los usos del suelo y las respectivas actividades que se desarrollan en el mismo, como del sistema de transporte, generando resultados más completos de las relaciones entre estos dos elementos determinantes de la dinámica urbana.

Mediante la utilización de Tranus (www.tranus.com) se podrán obtener las interacciones que existen entre los desarrollos habitacionales de la GMVV y la red de transporte que le provee movilidad a las diferentes zonas, en donde éstos se emplazan. Los resultados del análisis permitirán confirmar si la construcción de los desarrollos habitacionales de la GMVV, en lugares con buena accesibilidad, responden a un modelo de Desarrollo Orientado al Transporte (DOT), y si se logró de una manera exitosa. Además, el modelo Tranus permite realizar análisis tanto a escalas locales como regionales, lo que representa una gran ventaja

respecto a otros modelos, y es valorable en este estudio debido a que la evaluación se realizó en un ámbito regional.

En el año 2006 la Alcaldía Metropolitana de Caracas desarrolló un estudio de movilidad, mediante encuestas en hogares, de la que se desprenden las estadísticas de movilidad de los cinco municipios que comprenden al Área Metropolitana de Caracas, con las que se trabaja hasta la fecha (FONTUR, 2007). En el año 2007 la empresa Metro de Caracas llevó a cabo el *Plan de Expansión de la Red Metro Urbano-Regional Caracas-Guarenas-Guatire* (Modelística, 2008). Este estudio fue desarrollado entre 2007 y 2008 con el fin de contar con un plan de mediano y largo plazo para la CA Metro de Caracas con escenarios y proyecciones para la red metro.

También se incluyeron propuestas complementarias de transporte masivo que pudieran permitir el incremento de la eficiencia del propio Metro y la búsqueda de opciones hacia una integración, al menos física, si no operacional con otros modos. Los componentes del estudio incluyeron: la Encuesta de movilidad en hogares para la Región Metropolitana (EMH), estudio sociodemográfico y urbanístico, estudio del sistema de transporte público, estudio del sistema vial y de tránsito, modelación de usos del suelo y transporte y asistencia técnica. Por lo que este estudio permitió realizar la modelación de la red vial, usos del suelo y transporte de la RMC en el “software” Tranus.

Posteriormente en el año 2009 se elabora el *Plan Integral del Transporte Urbano de la Región Metropolitana de Caracas* cuyo objetivo fue complementar y extender el estudio para el plan de expansión de la red Metro de Caracas, agregando propuestas y análisis de vialidad y transporte importantes para el desarrollo del Sistema de Transporte Urbano de la RMC (Modelística, 2009).

2. METODOLOGÍA

La metodología se centró en el uso del “software” Tranus, mediante la modelación de los usos del suelo y transporte en dos escenarios, para comparar los comportamientos entre ambos. A continuación, se explica con detalle la aplicación de la misma.

2.1 Diseño Metodológico

Según de la Barra (2015) “los dos componentes principales de Tranus son el modelo de localización y usos del suelo, y el modelo de transporte. Ambos interactúan entre sí y en el tiempo”. De esta manera cambios en el sistema de transporte, como una línea de metro, no sólo impactan al sistema de transporte, captando pasajeros desde otros modos y generando más viajes, sino que modifican también los usos del suelo al mejorar los patrones de accesibilidad en determinados lugares. Similarmente, al generarse cambios en los usos del suelo, como es el caso de la Gran Misión Vivienda con proyectos como Ciudad Tiuna, no sólo se afecta la localización de la población y el empleo y el mercado inmobiliario, sino

también se generan cambios en el sistema de transporte para satisfacer la demanda.

El sistema Tranus está compuesto de una interfaz interactiva georeferenciada y un conjunto de programas de cálculo que son activados desde la interfaz. La interfaz, además de ser muy amigable, provee todas las herramientas gráficas para la codificación de la red multimodal de transporte. Toda la información se introduce a través de la interfaz, que cuenta además con una base de datos orientada a objetos, con representación explícita de escenarios. La interfaz soporta cualquier sistema de coordenadas geográficas, especialmente UTM. Cuenta con procedimientos estándar para importar datos de la red de transporte desde diversos Sistemas de Información Georeferenciados SIG y modelos de transporte, y también permite exportar la información.

Desde un punto de vista teórico, la espina dorsal de Tranus son los modelos de decisiones discretos logit que fueron adaptados para representar las decisiones de localización, los usos de suelos y las decisiones de transporte. El modelo de actividades y usos del suelo está basado en el modelo de insumo-producto espacializado, que tiene sus orígenes en el modelo de Keynes y que ha ido evolucionando con los agregados de Leontief (1941), quien logró construir un marco contable detallado para representar un sistema económico, y Leontief y Strout (1963), quienes introdujeron un “pool” de oferta y “pool” de demanda, para poder incorporar las mercancías de todas las regiones evaluadas y Wilson (1970), con su teoría de maximización de la entropía.

El modelo de transporte se diferencía considerablemente de los modelos convencionales en que el sistema está representado en una sola red multimodal. Destaca el procedimiento de búsqueda de caminos múltiples desarrollado en Tranus y la asignación multimodal con probabilidades logit. Como se verá más adelante, el sistema permite la representación de las rutas de transporte público en toda su complejidad.

Tranus puede representar redes urbanas, metropolitanas como en este caso, o regionales y nacionales, es decir, puede trabajar a cualquier escala. También puede representar todas las modalidades de transporte con mucha flexibilidad, incluyendo modos de carga y pasajeros.

La demanda de transporte es calculada sobre la base de la interacción entre actividades, y la información de origen-destino puede extraerse de una encuesta en hogares para los grandes flujos y para ajustar los parámetros de los modelos de comportamiento (generación, selección modal-selección de ruta). De lo anterior se entiende que es necesaria la recolección de un conjunto de información, que sirve de insumo a Tranus para poder hacer modelaciones realistas.

Para ingresar la información de usos del suelo y actividades al modelo es necesario crear una zonificación que en el modelo se representan como “zonas” que abarcan un área específica, y que dependiendo de la densidad del área que se esté trabajando se encontrarán más o menos

separadas. El caso de estudio cuenta con un total de 541 zonas. Estos también corresponden con la zonificación de transporte, en la Figura 2 puede observarse la zonificación.

Para este estudio, se empleó la información de la encuesta de movilidad en hogares llevada a cabo en el 2005 en el AMC, que permitió obtener datos relativos a tiempos de viaje, de espera, costo de viajes, zonas de origen y de destino de los usuarios de distintos modos de transporte, tenencia vehicular y datos socioeconómicos.

En cuanto a la información relativa a población, se emplearon los datos del INE sobre el censo del 2001, se actualizaron con los datos del censo del 2011 y se proyectó para el año a evaluar que es el 2017.

El estudio para el *Plan de Expansión de la Red Metro Urbano-Regional Caracas-Guarenas-Guatire* fue uno de los principales insumos de información para realizar la modelación en Transus. De este estudio se obtuvo la información relativa a usos del suelo, rutas de transporte público, empleo, información socioeconómica proveniente de la encuesta de movilidad en hogares que se realizó en todas las zonas que componen la Región Metropolitana de Caracas y que sirvió como complemento a la encuesta realizada en el AMC en el 2005.

Una vez introducida toda la información en el modelo y calibrado el mismo, se procedió a crear los escenarios con los cuales se evaluará el impacto de los urbanismos de la Misión Vivienda sobre el sistema de transporte.

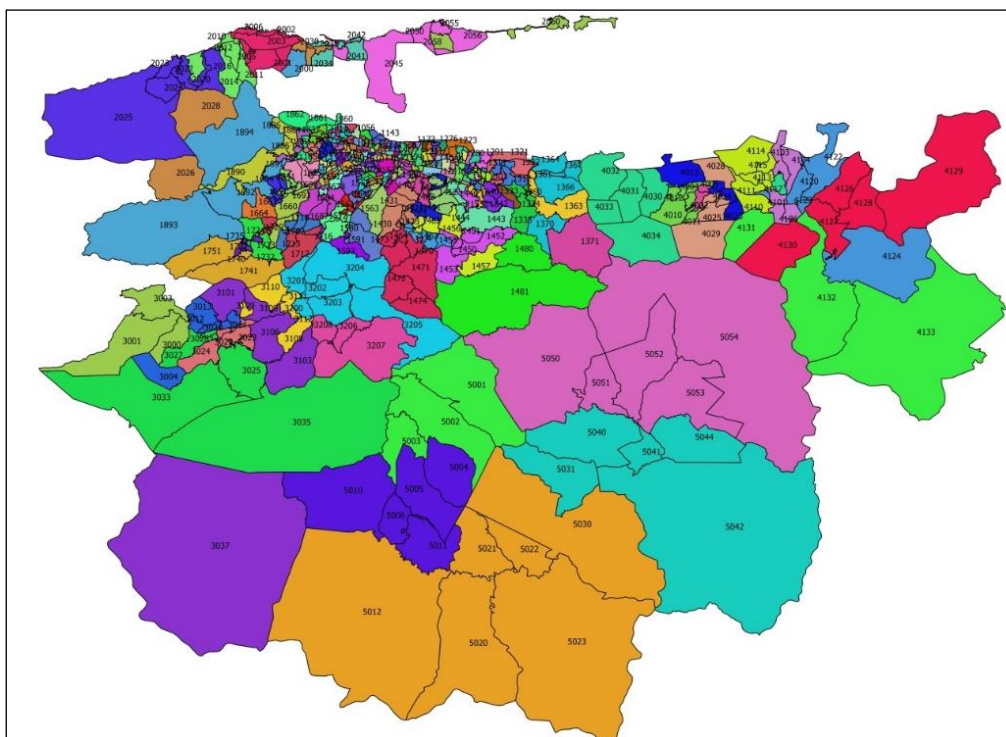


Figura 2. Zonas de transporte de la RMC

El primer escenario corresponde a un año base en el que no existen los urbanismos de Misión Vivienda, que permite observar el comportamiento del mercado y del transporte en una situación en que no exista una oferta de vivienda tan grande por parte del estado. El segundo escenario, corresponde a una situación en que los urbanismos de Misión Vivienda que habrán sido culminados para el año 2017, se encuentran habitados (alrededor de 50,000 viviendas). Lo que permite observar los impactos que la redistribución de los habitantes en la RMC, puede tener sobre el sistema de transporte y la accesibilidad de la población. Cabe destacar que se decidió estudiar el año 2017 porque en este año la cantidad de urbanismos habitados son lo suficientemente significativos para generar impactos en el sistema de transporte.

Para este escenario fue necesario introducir la información relativa a la cantidad de hectáreas que ocupa la Misión Vivienda, en cada micro zona. Al estar construida la Misión Vivienda por diferentes instituciones del estado, esta información no se encuentra centralizada, y además no todas las instituciones tienen actualizada la información del estatus de los diferentes urbanismos, por lo que fue necesario solicitar información a la empresa metro de Caracas, así como a la Alcaldía Metropolitana que gobierna el AMC. Así mismo se realizó investigación en la web, sobre noticias de la entrega de los diferentes urbanismos, para corroborar el estatus de los mismos.

Una vez creados los escenarios, se procedió a correr los mismos para obtener las tablas con los resultados de asignación, localización y transporte. Estas tablas se procesan para obtener información más concisa, y finalmente se realiza el análisis sobre los resultados.

Para los usos de suelo se obtuvo información acerca de la cantidad de personas por actividad en los sectores: empleo básico, gobierno, comercio y servicios, educación, salud, población de estratos A, B y C, población de estrato D, población de estrato E. En cuanto al aumento o descenso de cantidad de suelo utilizado, se evaluaron en los siguientes sectores: suelo industrial, suelo comercios y servicios, vivienda multifamiliar, vivienda unifamiliar, barrios consolidados y barrios no consolidados.

Mientras que los resultados de transporte se obtienen según los viajes con origen el hogar y destino: comercio-servicios, educación, trabajo estrato socioeconómico bajo, trabajo estrato socioeconómico medio, trabajo estrato socioeconómico alto y salud.

Se calcularon las desutilidades de la Misión Vivienda sobre el sistema de transporte entre el escenario base y el alternativo, para cada zona de transporte de la RMC, según origen de los viajes. Esta información se unificó para analizar el beneficio en cada zona de la RMC.

3. RESULTADOS

Una vez analizados los resultados, se observó una reducción en el tiempo, costo y distancia

de viajes al trabajo de los estratos bajos, y en general hubo una reducción de estos valores en los viajes al estudio y la salud. Todo ello es de esperarse dado que la Misión Vivienda, está ubicada en zonas céntricas de la ciudad, con buena accesibilidad al transporte público. Sin embargo, estas reducciones son poco significativas, como se observa en la Tabla 1, lo cual se atribuye a la falta de planificación y toma de medidas al problema de congestión, del sistema de transporte de la región, como parte de un plan conjunto con el programa de viviendas.

Además, muchas de las zonas en que se construyeron los urbanismos, especialmente en el AMC, tenían poblaciones de refugiados en edificaciones gubernamentales u otros, que se encontraban en lugares céntricos, lo que implica que esta población ya tenía buena accesibilidad antes de ser trasladados a las viviendas de la Misión. Lo que trae como consecuencia los bajos índices en los descensos en los tiempos de viaje y costo de los mismos.

Tabla 1. Distancia, costo y tiempo de viajes en escenario base y escenario con Misión Vivienda

| Actividad | Distancia/viaje | | Costo/viaje | | Tiempo promedio de viaje | |
|-----------------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| | Escenario Base sin MV | Escenario alternativo con MV | Escenario Base sin MV | Escenario alternativo con MV | Escenario Base sin MV | Escenario alternativo con MV |
| Hogar-comercio y servicios | 17.27 | 17.23 | 1.44 | 1.43 | 78 | 77 |
| Hogar-educación | 23.17 | 23.03 | 1.87 | 1.86 | 100 | 99 |
| Hogar-trabajo estrato bajo | 26.15 | 25.62 | 1.77 | 1.71 | 105 | 103 |
| Hogar-trabajo estrato medio | 21.23 | 21.27 | 1.76 | 1.76 | 91 | 92 |
| Hogar-trabajo estrato alto | 18.03 | 18.64 | 1.68 | 1.72 | 77 | 79 |
| Salud | 23.24 | 23.12 | 1.84 | 1.83 | 96 | 96 |

Sin embargo, la Misión Vivienda sí genera beneficios de transporte, como se puede observar en la Tabla 2, que muestra resultados en la hora pico de la mañana. Las regiones en las que se desarrollaron la mayoría de los urbanismos como Vargas y AMC fueron las que obtuvieron los mayores beneficios sobre el escenario sin Misión Vivienda. Los Altos Mirandinos que tuvieron muy pocos desarrollos de Misión Vivienda percibieron pérdidas económicas por encima de los 12 mil dólares en el escenario con Misión Vivienda respecto al escenario base, aunque el total es significativo.

Esto se debe a que los desarrollos de los altos Mirandinos no tienen buenas condiciones de accesibilidad al transporte público, a diferencia de las zonas de Vargas y AMC, cuyos desarrollos cuentan con buena accesibilidad y están bien abastecidas de transporte público.

Dentro del AMC hay un sector de la ciudad en el que ocurre una situación que difiere del comportamiento general, y es dentro del Fuerte Tiuna (que es una zona militar), en donde se lleva a cabo uno de los desarrollos más importantes de la ciudad con un total de 11,400 viviendas, es decir, una nueva población de aproximadamente 59 mil habitantes. En esta zona la utilidad es negativa respecto al año base, ya que el proyecto de vivienda no incluye la planificación de la vialidad y del transporte, y sólo posee una ruta de Metro-bus que le provee de transporte público al sector, en una vialidad tipo local por sus características geométricas, por lo que los habitantes de este sector tienen mala accesibilidad y conectividad con el resto de la ciudad.

En la Figura 3 se observa gráficamente la magnitud de los beneficios percibidos por los distintos sectores que conforman la RMC. Aun cuando los beneficios en Valles del Tuy abarcan mayor territorio Vargas es el que presenta los beneficios económicos más altos, al igual que el AMC, lo que se debe a que son ciudades más concentradas en donde las distancias de recorrido son menores y por ende se reducen los costos de viaje.

Al analizar la diferencia entre los pasajeros-kilómetros transportados por modo en la hora pico, entre el escenario con Misión Vivienda y el escenario Base, se observa una importante reducción en el uso del mini-bus suburbano, que se debe al aumento de la oferta habitacional en el AMC, trayendo como consecuencia una reducción en la cantidad de viajes entre éste y el resto de los sectores de la RMC. Lo que se confirma al observar que, con el metro, Metro-bus suburbano y el tren de los Valles del Tuy ocurre lo mismo, pero en una menor medida.

Tabla 2. Beneficios económicos de la Misión Vivienda sobre el sistema de Transporte en una hora pico de la mañana

| Región | Beneficio total (\$) |
|------------------|----------------------|
| AMC | 112.877 |
| Vargas | 169.965 |
| Altos Mirandinos | -12.210 |
| Guarenas-Guatire | 68.526 |
| Valles del Tuy | 101.508 |
| TOTAL | 440.666 |

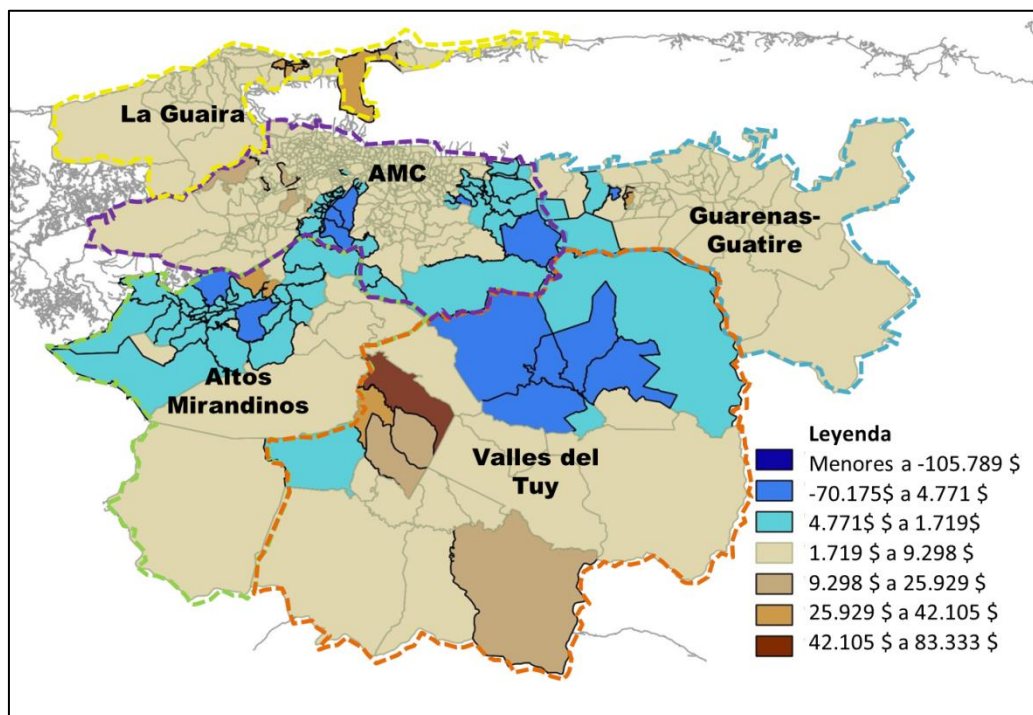


Figura 3. Beneficios de la Misión Vivienda en el Transporte respecto al escenario base

Mientras que, como se observa en la Figura 4, el uso de la moto tiene un crecimiento notable de más de 60,000 pasajeros-kilómetros transportados en la hora pico. Lo que quiere decir, que al existir deficiencias en el servicio del transporte público los usuarios eligen utilizar la moto como modo principal de transporte, en especial la población de estratos bajos, puesto que este es el modo privado más accesible económicamente y más eficiente. Como bien lo expresa Mundó (2012) “en función de la oferta de transporte entre el origen y el destino de su viaje, el individuo se desplazará a través del modo que le ofrezca el mayor cúmulo de ventajas comparativas en términos de tiempo, costo y comodidad”.

En lo que respecta a los barrios, se observa una pequeña reducción de los mismos en el escenario con Misión Vivienda, lo que es de esperarse debido a que estos urbanismos están

dirigidos a la población de estratos socioeconómicos D y E, que es la que habita en barrios. Sin embargo, la reducción es baja, lo que se debe a que dentro del país existe un déficit habitacional acumulado, que es lo que justificó la construcción de viviendas por parte del estado; por ello la población en barrios ha sido poco atendida, además los primeros urbanismos desarrollados fueron destinados a los refugiados de los diferentes desastres naturales ocurridos en el país en las últimas dos décadas. En la Tabla 3 se puede observar la reducción de hectáreas de barrio en cada zona de la RMC.

Mientras que el uso multifamiliar, entendiendo éste como las edificaciones de alta densidad desarrolladas por empresas privadas, tuvo una notable reducción en el AMC en el escenario con Misión Vivienda, lo que es de esperarse debido a la alta oferta de urbanismos de alta densidad que está desarrollando la Misión Vivienda en esta ciudad.

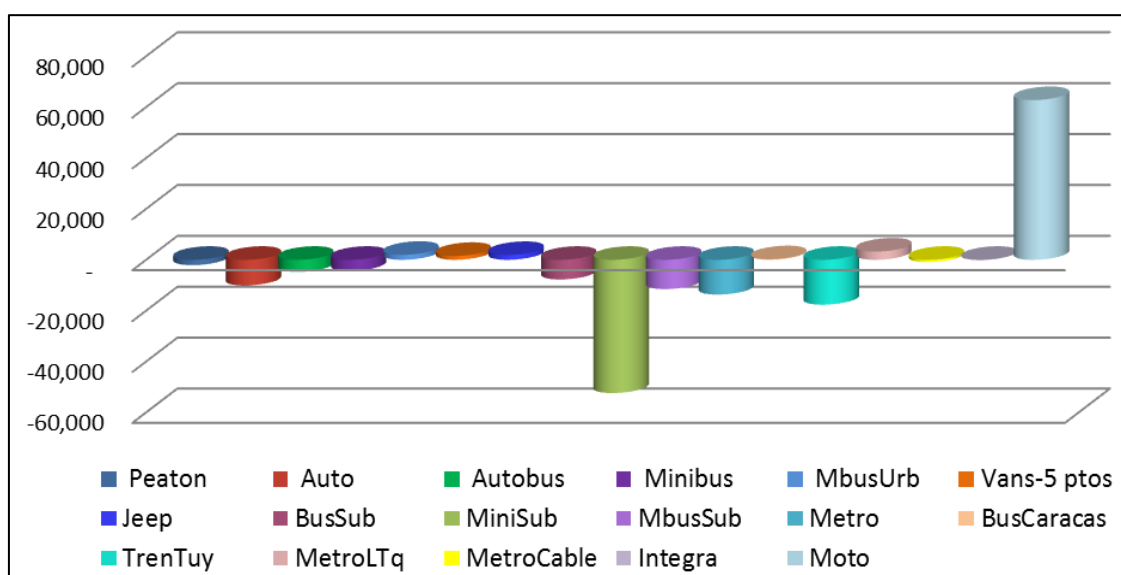


Figura 4. Diferencia de Pasajeros-km/modo transportados entre escenario base y con Misión Vivienda

Tabla 3. Reducción de hectáreas utilizadas según tipo de uso en el escenario con Misión Vivienda respecto al escenario base

| | Ha reducidas en Barrios | Ha Multifamiliar reducidas | Ha Unifamiliar reducidas |
|------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------|
| AMC | 17 | 12 | 2 |
| Vargas | 8 | -3 | 2 |
| Altos Mirandinos | 0 | 0 | -1 |
| Guarenas-Guatire | 6 | 6 | 5 |
| Valles del Tuy | 17 | 9 | -1 |

Este uso presenta un pequeño crecimiento en el escenario con Misión Vivienda en el sector Vargas, lo que quiere decir que aún existían terrenos desarrollables y que construir en el sector es atractivo para las constructoras privadas. Mientras que en los Altos Mirandinos y los Valles del Tuy es atractiva la construcción en terrenos con uso unifamiliar, y se refleja en el crecimiento de estos en el escenario con Misión Vivienda.

En conclusión, aun cuando la Misión Vivienda, directa o indirectamente, haya realizado desarrollos orientados al transporte, por ubicar urbanismos de alta densidad en zonas bien servidas de transporte público, al funcionar sobre una vialidad congestionada, por no haberse realizado un plan integrado de tránsito/transporte público y vivienda, las mejoras en la accesibilidad no son tan notables y se terminó por promover el uso de modos privados, en este estudio específico la moto.

Sería recomendable realizar un escenario en que se mejoren las condiciones del servicio y operación del transporte público, para observar en cuánto se reducen los tiempos de viaje y los costos de los mismos, de manera de corroborar con más sustento la hipótesis acerca de las mejoras en la accesibilidad de los habitantes de la Misión Vivienda.

Considerando las condiciones económicas que enfrenta el país en la actualidad, con la reducción en importaciones de repuestos, cauchos, baterías y diversas materias primas, sería útil evaluar un escenario en el que las condiciones de infraestructura y transporte desmejoren y se mantengan los desarrollos de Misión Vivienda, y analizar cómo se ven afectadas las condiciones de movilidad de los habitantes de la región.

4. CONCLUSIONES

Los desarrollos habitacionales de la Gran Misión Vivienda Venezuela sí corresponden a un modelo de Desarrollo Orientado al Transporte, por concentrar el crecimiento urbano alrededor de corredores de transporte público, y por ser desarrollos de alta densidad con mezcla de usos en las edificaciones. Estos desarrollos cuentan con buena accesibilidad. Sin embargo, las mejoras en la movilidad dentro del sistema de transporte fueron de baja magnitud, consecuencia de una falta de planificación integrada, y las consecuentes mejoras, con el sistema de transporte de la ciudad.

De esto se entiende que para que un DOT sea exitoso es necesario no sólo ubicar desarrollos habitacionales en lugares bien servidos por el transporte público, y cercanos a vías expresas, sino además asegurarse de generar mejoras en dicho sistema de transporte para que la prestación del servicio de transporte público, y las condiciones de capacidad de las vías, tengan la posibilidad de satisfacer la demanda. Apoyándose en estrategias dirigidas a favorecer la movilidad en transporte público, y a la interconexión de modos no motorizados como la bicicleta y los viajes a pie, que según Bishop (2015) son elementos que también deben incluir los modelos de DOT.

REFERENCIAS

- BISHOP, Z. (2015). *Transit-oriented development. Benefits and Studies*. Ball State University, Virginia, United States.
- DE LA BARRA, T. (1989). *Modelación integrada de usos del suelo y transporte*. Cambridge University Press.
- DE LA BARRA, T. (2015). *Descripción general del sistema TRANUS*. En www.tranus.com
- FONTUR (2007). *Resultado de la Encuesta de Movilidad 2005 del Distrito Metropolitano de Caracas*. *Novedades Técnicas en Transporte*. 7 (1/2), pp. 34-39.
- HOLMES, J. Y HEMERT, J. (2008). *Transit Oriented Development*. Rocky Mountain Land Use Institute. Estados Unidos.
- LEONTIEF, W. W. (1941) *The Structure of the American Economy 1919-1939*. 2a ed. 1951. New York: Oxford University Press.
- LEONTIEF, W. W. Y STROUT, A. (1963) *Multi-regional input-output analysis*. En *Structural Inter-dependence and Economic Development*, edit. Barna. London: McMillan.
- LIZÁRRAGA, C. (2012). *Expansión metropolitana y movilidad: el caso de Caracas*. EURE. 38 (113), Pp. 99-125.
- MODELISTICA (2008). *Plan de Expansión de la Red Metro Urbano-Regional Caracas-Guarenas-Guatire*.
- MODELISTICA (2009). *Estudio Integral de Transporte del Área Metropolitana de Caracas*.
- MUNDÓ, J. (2012). *Caracas: Su sistema de transporte y movilidad*. En: ALMANDOZ, A. (ed.) *Caracas, de la metrópoli súbita a la meca roja*, 7ma edición. OLACCHI. Pp. 213-233.
- WILSON, A. G. (1970). *Entropy in Urban and Regional Modelling*. London: Pion.

46 Planificación del estacionamiento vehicular en campus universitarios, un cambio de paradigma: caso Bogotá, Colombia

Fredy Leandro Espejo Fandiño

Daniel Alejandro Pérez Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

RESUMEN

La presente investigación consistió en evaluar la planificación del estacionamiento vehicular en dos campus universitarios de la ciudad de Bogotá a partir de dos enfoques teóricos que difieren significativamente en la manera cómo afrontan el problema del estacionamiento. Un enfoque comprende los métodos tradicionales o viejo paradigma de la planificación el cual contempla que el estacionamiento debe ser abundante y gratuito, mientras que el enfoque no tradicional o nuevo paradigma de la planificación considera que el estacionamiento debe ser óptimo y con precio. El primer enfoque que vincula las prácticas actuales y comunes para evaluar el estacionamiento produjo sobreofertas a partir del 200% mientras que el segundo enfoque demostró que existen maneras alternativas de evaluar el estacionamiento encontrando relación entre variables asociadas al usuario, la oferta de transporte y las estrategias de gestión de la demanda de transporte que pueden lograr reducciones considerables de las necesidades de estacionamiento en los campus.

Palabras clave: planificación, estacionamiento, campus.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento del índice de motorización en las ciudades latinoamericanas incide en la demanda de estacionamientos, pues cada vez son más los requerimientos de espacio para poder estacionar vehículos. En la ciudad capital de Colombia el registro indica que sólo entre el año 2005 y 2010 “el parque de vehículos privados en Bogotá ha crecido a una tasa promedio del 10.5% anual” (Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2010) con un índice de 178 vehículos por 1,000 habitantes para el año 2013. Esta situación representa necesidades de estacionamiento que aumentan exponencialmente mientras que la infraestructura crece a otras velocidades y las técnicas para gestionar la demanda de aparcamientos son poco estudiadas. Las universidades no están ajenas a esta problemática, son grandes centros generadores de viajes y los problemas de congestión y de aparcamiento están a la vuelta de la esquina.

La planificación y el dimensionamiento de este tipo de obras de aparcamientos fuera de vía, destinada a los automóviles particulares constituyen en el eje central de esta investigación,

aplicado a un caso específico, campus universitarios. Estimar la oferta y demanda de estacionamiento que tendrá un uso educativo de nivel superior es un proceso que depende totalmente del enfoque planteado en cada caso particular.

En primer lugar, la investigación encuentra que la planificación del estacionamiento en los campus universitarios de la ciudad de Bogotá se encuentra enmarcado dentro de un paradigma que se esfuerza por ofrecer estacionamiento abundante y sin costo, y que las prácticas orientadas hacia el nuevo paradigma que se encarga de ofrecer estacionamiento óptimo y con precio, son escasas o prácticamente inexistentes a nivel local.

En segundo lugar, haciendo uso de las distintas metodologías a nivel mundial disponibles en la literatura se efectúa la estimación de oferta de estacionamiento que deberían proveer dos campus seleccionados de la ciudad de Bogotá, el de la Universidad Nacional de Colombia (UN) y el de la Universidad de los Andes (UA), haciendo énfasis especial en las variables involucradas en cada proceso y permitiendo el comparativo con el registro en la hora de máxima de demanda (HMD) actual observada en cada campus.

Por último, se propone incorporar dentro del proceso de planificación, cuestiones asociadas a la gestión de la demanda de transporte o “Transportation Demand Management” (TDM, por sus siglas en inglés), en la línea para adecuar este proceso dentro del nuevo paradigma lo cual es evaluado a través de una encuesta de preferencias declaradas y preferencias reveladas permitiendo obtener resultados interesantes para determinar las variables que tienen influencia en la demanda de estacionamiento y las oportunidades que existen para disminuir las necesidades de aparcamiento en los campus.

2. ESTADO DEL ARTE

Luego de una revisión minuciosa de los estudios de tránsito aprobados por la Secretaría Distrital de Movilidad (SDM) y presentados por distintas universidades de la ciudad de Bogotá, se encontraron dos aspectos determinantes y comunes a todos los estudios para efectuar la planificación del estacionamiento. Por un lado, el componente normativo que obliga al cumplimiento de ciertos aspectos urbanísticos predeterminados, y por otro, el componente técnico que se soporta en estudios detallados para determinar la demanda y rotación de estacionamientos. Adicionalmente, en la literatura se encuentran algunas metodologías para evaluar la planificación del estacionamiento que hacen parte de diversos autores o institutos, principalmente de los Estados Unidos donde se ha identificado una evolución notoria en esta línea de investigación.

Conforme con lo anterior, se definen tres aspectos determinantes en el estado del arte de la planificación del estacionamiento vehicular: el normativo, el técnico y el analítico.

2.1. Orientación normativa de la planificación del estacionamiento vehicular

Para el caso de las ciudades colombianas el enfoque normativo está consignado en el Plan de Ordenamiento Territorial (POT), en el caso de Bogotá con el Decreto 190 de 2004 que contiene el conjunto de objetivos directrices, políticas, estrategias, metas, programas, actuaciones y normas para orientar el desarrollo físico del territorio.

Dicho decreto contiene un anexo donde se establece la exigencia general por uso en cuotas de estacionamiento, o en otras palabras los requisitos mínimos de estacionamiento (RME) que son de obligatorio cumplimiento para la aprobación de los estudios de tránsito. Dichas cuotas se aplican sobre áreas generadoras de estacionamiento (descontando áreas de estructuras, fachada, áreas de circulación, etc.), y dependen de las zonas normativas por demanda de estacionamiento (ZNDE) que homogenizan sectores de la ciudad en donde se supone que las necesidades de estacionamiento son similares. Ver Tabla 1.

Los RME mostrados en la Tabla 1 permiten analizar que la oferta de estacionamiento depende únicamente de dos variables: el área neta construida y la ubicación de la universidad dentro de la ciudad. Lo anterior como se muestra en el capítulo 2.3 representa problemas serios en la planificación del estacionamiento, en el sistema de movilidad y en el desarrollo urbano (Shoup, 2005).

2.2. Orientación técnica de la planificación del estacionamiento vehicular

Las universidades y en general cualquier proyecto que cause modificaciones al sistema de tránsito deben presentar ante las entidades distritales un estudio de tránsito junto a otros estudios para obtener la licencia urbanística y los permisos de operación.

Dentro de los estudios de tránsito es obligatorio presentar un capítulo destinado a determinar el número de estacionamientos privados y de visitantes. Lo más común es realizar un estudio de utilización del estacionamiento que permite determinar la demanda y la rotación del estacionamiento, el tiempo de permanencia y la acumulación en períodos de 15 minutos. El resultado típico consiste en establecer la ocupación máxima sucedida en la hora pico para convertirla en el parámetro de diseño.

Tabla 1. Requisitos mínimos de estacionamiento para universidades de Bogotá

| Uso específico | Escala | Tipo | Cupos según zonas normativas por demanda de estacionamiento | | | |
|----------------|---------------|------------|---|-----------|------------------------|------------------------|
| | | | A (alta) | B (media) | C (media baja) | D (baja) |
| Educativo | Metropolitana | Privado | 1 x 60 m ² | | 1 x 100 m ² | |
| | | Visitantes | 1 x 60 m ² | | 1 x 100 m ² | 1 x 250 m ² |

A partir de la ocupación máxima los ingenieros determinan cuál debe ser la oferta de estacionamiento mediante la siguiente expresión:

$$\text{Número de estacionamientos} = \text{Máx ocupación horaria} \times \frac{\text{Área construida futura}}{\text{Área construida actual}} \quad (1)$$

Las variables de análisis en este caso obedecen únicamente al comportamiento vehicular observado in situ, es decir, a partir del registro de los vehículos que demandan un espacio dentro de un sector geográfico. No se analizan otras variables que permitan indicar que la demanda observada es función de otras características distintas al espacio disponible. Adicionalmente, no se perciben aspectos que permitan inferir que esta técnica está asociada con las políticas de racionalización del vehículo particular planteadas en el Plan Maestro de Movilidad de la ciudad.

De hecho, si se observa la Ecuación 1 se encuentra que la manera de planificar el estacionamiento está orientada a satisfacer los máximos niveles de demanda, que se presentan en una sola hora del día, causando que las 23 horas restantes se presente una sobreoferta de estacionamiento que incentiva la mayor utilización del vehículo. Por ejemplo, el cálculo de espacios vacíos en una jornada típica del estudio de rotación de placas de la UN indica que existen 612 espacios libres en promedio por franja horaria en este campus que significan un 38.3% de sobreoferta promedio. Ver Figura 1.

Lo anterior se vuelve más preocupante si se tiene en cuenta que la exigencia de RME tiene prelación sobre la oferta calculada a partir de la Ecuación 1. Es decir, que si la oferta resultante a partir de la normativa supera la demanda pico observada en el sitio, debe disponerse por una condición legal y obligatoria, los cupos de estacionamiento establecidos en el POT.

Para ilustrar un poco esta situación se describen en la Tabla 2 algunos casos encontrados en los estudios de tránsito analizados a nivel local. Los RME representan problemas en la planificación del estacionamiento, pues algunas veces dichos requisitos no se calculan de manera explícita en los estudios porque generalmente representan necesidades exageradas de área que se traducen en costos muy altos para las universidades o porque significan una sobreoferta importante. En otros casos, la situación es más crítica, cuando se proponen cupos iguales a los exigidos por los RME aunque la demanda observada sea mucho menor.

Lo anterior implica que la ocupación de estacionamiento en la HMD es por lo general inferior a la oferta de cupos de cada universidad, convirtiendo la demanda máxima en oferta mínima sin que la administración distrital se dé cuenta que la misma normativa está promocionando grandes lotes de estacionamiento que a su vez incentivan el mayor uso del automóvil.

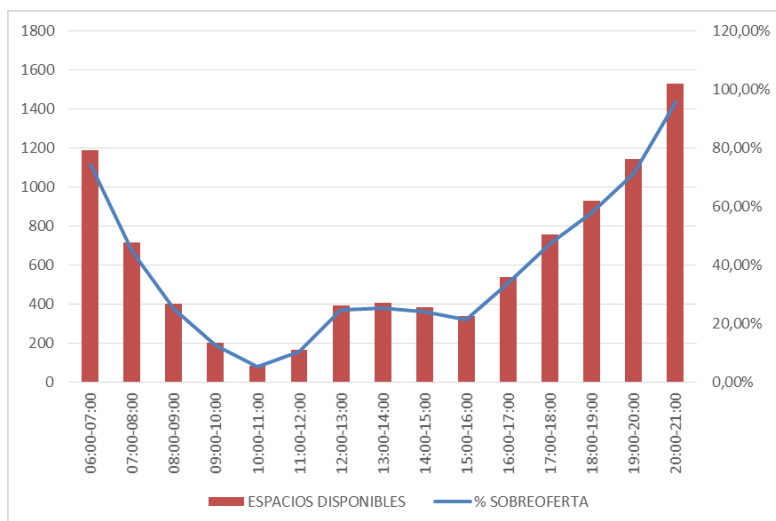


Figura 1. Porcentaje de espacios sin ocupar en un día típico campus UN

Tabla 2. Cupos determinados en estudios de tránsito de universidades en Bogotá

| Universidad | Tipo estudio para determinar demanda | Ocupación en la HMD | % de ocupación en la HMD | Cupos por RME | Cupos adoptados y aprobados por SDM |
|--|--|---------------------|--------------------------|------------------|-------------------------------------|
| Universidad de la Salle | Rotación de placas | 292 | 52.3% | 552 | 558 |
| UN Sede Bogotá | Rotación de placas | 1.406 | 82.0% | No se calcularon | 1.714 |
| Universidad Javeriana | Rotación de placas | 1.447 | 66.4% | 2.178 | 2.178 |
| Edificio de estacionamientos centro deportivo UA | Encuesta de preferencias declaradas y rotación de peatones | 18 | 5.0% | No se calcularon | 360 |
| Fundación Universitaria Panamericana | Rotación de placas | 30 | 39.0% | No se calcularon | 77 |

2.3. Orientación analítica de la planificación del estacionamiento vehicular

La planificación del estacionamiento se comenzó a configurar prácticamente desde los inicios de 1900 en los Estados Unidos coincidiendo con la etapa de masificación del automóvil. Los problemas se comenzaron a hacer evidentes de inmediato en ciudades como Detroit y Boston. Posteriormente, el crecimiento acelerado del automóvil hizo que las ciudades estadounidenses respondieran de inmediato ampliando la oferta de estacionamientos en vía y fuera de vía. Luego aparecieron los grandes estacionamientos, se

colocaron parquímetros en las aceras de las calles comerciales, se estableció que los nuevos desarrollos comerciales y residenciales incluyeran un lugar para el aparcamiento, y finalmente, hacia 1960 la mayoría de las ciudades americanas habían establecido un mínimo de espacios de estacionamiento por uso de suelo sin evaluar los efectos sobre el desarrollo urbano (Weinberger et al, 2012).

Tempranamente, la Comisión de planificación del Condado de Los Ángeles (Mogren y Smith, 1952) concluyó que las ciudades deberían solicitar que cada edificación proveyera al menos espacio para estacionamiento en oficinas y tiendas. Posteriormente, Mogren y Smith (1952) fueron los primeros en discutir en su libro *Zoning and Traffic* que las ciudades norteamericanas necesitaban establecer RME fuera de vía en el máximo espacio posible de cada edificación. Esta propuesta fue tan popular que la gran mayoría de ciudades del mundo la adoptaron en sus ordenanzas locales.

Posteriormente, aparecieron metodologías específicas para cada uso de suelo y propuestas de cada ciudad principalmente provenientes de los Estados Unidos. El “Eno Center For Transportation” (ENO) tiene varios escritos al respecto, Whitlock (1982) con su publicación “Parking for Institutions and Especial Events”, y Weant y Levinson (1990) con su publicación “Parking” establecieron aspectos relacionados con la planificación, diseño, desarrollo, implementación, administración y operación de estacionamientos, incluyendo aspectos relacionados con los RME y con la planificación de usos especiales como las universidades, hospitales y eventos de concentración masiva de personas. Tres años después, el “Urban Land Institute” (1985) desarrolló una metodología denominada “Shared Parking” para determinar la oferta de estacionamiento que puede ser utilizada para servir dos o más usos de suelo individuales y sin conflicto o invasión, metodología destinada comúnmente a usos residenciales y comerciales. Y en este mismo año, el Institute of Transportation Engineers ITE lanzó la primera edición del reporte más difundido a nivel mundial para la planificación del estacionamiento denominado “Parking Generation” que realiza un trabajo de tipo estadístico proporcionando valores de la demanda de aparcamiento para distintos usos del suelo a partir de datos disponibles en América del Norte.

Las metodologías referenciadas se han constituido en la base de la planificación del estacionamiento no sólo en los Estados Unidos sino en muchos países alrededor del planeta que han adoptado estos criterios en su ejercicio profesional y de manera más propia en sus mismas disposiciones normativas (Shoup, 2005). Así, por ejemplo, los RME han sido ampliamente adoptados en las normativas de ordenamiento territorial de municipios y ciudades del mundo, incluyendo Colombia.

Para Litman (2011) el tipo de planificación efectuado hasta este momento puede ubicarse en un contexto que el autor ha denominado el viejo paradigma de la planificación del estacionamiento el cual se caracteriza por ser un esquema que contempla que el aparcamiento debe ser abundante y gratuito, que se esfuerza por maximizar la oferta y

reducir al mínimo el precio del estacionamiento, supone que los estacionamientos nunca se deben llenar, que los costos de las instalaciones de estacionamiento deben ser incorporados en los costos generales del edificio o que deben ser subvencionados por el gobierno y que cada destino debe satisfacer sus propias necesidades de estacionamiento.

A partir de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo de la ONU llevada a cabo en 1987, se comenzaron a plantear preguntas en relación con la necesidad de cambiar las prácticas de los humanos que han generado problemas ambientales y de desarrollo urbano en el mundo. El estacionamiento no ha sido ajeno a este enfoque y se puede decir que su investigación bajo este enfoque es reciente, desde la década de los 90's. Según Litman (2011) y Shoup (2005) la planificación del aparcamiento está experimentando un cambio fundamental de paradigma que establece formas distintas de percibir el problema y de dar soluciones a éste.

Shoup (2005) ha sido el investigador que ha descrito de mejor manera las graves deficiencias que soportan los RME, algunas son las siguientes: pueden representar problemas que van desde copiar requisitos o valores mínimos de otras ordenanzas (pues al fin y al cabo son norma legal en otra ciudad y se supone que las normas son correctas), suponen que existe una alta correlación entre el área construida y la demanda de estacionamiento (lo cual no siempre es cierto), aunque representan demanda máxima registrada generalmente se convierten en oferta mínima, pueden aumentar el costo del inmobiliario y disminuir la densidad urbana, muchas veces se convierten en estacionamiento gratuito lo cual significa que se está planeando sin economía y no transfieren el costo del aparcamiento directamente al usuario sino que lo trasladan a la totalidad de la población, entre otras cuestiones.

Esta manera de efectuar la planificación del estacionamiento a nivel local representa de hecho una falla sustancial. Pueden tener efectos adversos como aumento de los costos ambientales (Environmental Protection Agency, 2006; Monroe County Department of Planning and Development, 2007 y Shoup 2005), aumento de los costos constructivos (Weinberger et al, 2012), disminución de espacio disponible para infraestructura de transporte público o transporte no motorizado (Pineda y Abadía, 2011) y desequilibrios entre la oferta y la demanda (Moeinaddini et al, 2012).

Lo que se ha denominado nuevo paradigma de la planificación del estacionamiento por parte de Litman (2011) es un cambio fundamental para tratar de pasar a un esquema en el que el aparcamiento debe ser óptimo y con precio, que considera que demasiada oferta es tan dañina como muy poca oferta, que los precios de estacionamiento muy altos son tan dañinos como los muy bajos, que se esfuerza por utilizar las instalaciones de manera eficiente, que considera que los lotes de estacionamiento llenos son manejables, que favorece la imputación de costos del estacionamiento directamente al usuario, que ofrece recompensas económicas a las personas que reducen la demanda de estacionamiento y que reconoce que

el sistema de transporte y los usos de suelo se desarrollan de tal manera que la planificación del estacionamiento requiere ajustes frecuentes.

En este sentido, algunas universidades han tratado de adoptar cambios en su tipo de planificación, por ejemplo, Shannon et al. (2006) en un estudio realizado en la Universidad de Australia Occidental encontraron que una estrategia eficaz para potenciar los cambios a medios de transporte activos en las universidades es la reducción de la subvención del estacionamiento. Barata et al. (2011) realizaron otra investigación donde encontraron que buen porcentaje de los conductores que hacen uso del estacionamiento en la Universidad de Coimbra (Portugal) están dispuestos a cambiar de modo de transporte si se les otorga una subvención en los pasajes de transporte público. Otra investigación realizada en la Universidad Tecnológica de Malasia por Moeinaddini et al. (2012) consideró que dos de las variables que más inciden en la utilización del estacionamiento es la sombra y el estado de la infraestructura peatonal en el estacionamiento. En la Universidad de California, Zhou (2012) encontró que tener amigos o compañeros cerca del lugar de residencia aumenta la utilidad del transporte público y que los estudiantes que viven solos o con su familia son más propensos a conducir solos al campus en comparación con los estudiantes que viven en residencias compartidas. En la Universidad de Idaho, Delmelle y Delmelle (2012) analizaron cuál sería el precio máximo a pagar por el estacionamiento y por el combustible antes de cambiar a un medio de transporte activo. Por su parte, Aoun et al. (2013) en el campus de la Universidad Americana de Beirut encontraron necesario implementar servicios de taxi compartidos para desestimular los viajes al campus en coche privado en virtud de los altos ingresos de la población universitaria y sus preferencias en el medio de transporte.

Tal como afirma Aoun et al. (2013) a excepción de Europa y Estados Unidos la literatura sobre aplicaciones TDM son escasas o inexistentes.

3. PLANIFICACIÓN DEL ESTACIONAMIENTO BAJO ENFOQUES TRADICIONALES

Una vez seleccionados dos de los campus más representativos de la ciudad de Bogotá y haciendo uso de información secundaria disponible, se realizó la planificación del estacionamiento bajo los métodos tradicionales, considerando los RME, los estudios de rotación de estacionamiento, y algunas metodologías descritas bajo el enfoque del viejo paradigma que permiten su aplicación en este tipo de uso de suelo. Las metodologías consideradas bajo este enfoque son las siguientes:

- Decreto Distrital 190 de 2004 que establece los RME para la ciudad de Bogotá.
- Estudios de rotación de placas de estacionamientos, que se constituyen en la técnica tradicional.
- Metodología del “Eno Center for Transportation” ENO.
- Metodología del Institute of Transportation Engineers ITE.

3.1. Cálculo de oferta de estacionamiento a partir del Decreto 190 de 2004

En primer lugar, se calcula la oferta mínima de estacionamiento en los dos campus seleccionados considerando la reglamentación actual de los RME establecidos para la ciudad de Bogotá en la Tabla 3.

Las variables que inciden en la planificación del estacionamiento para este caso son tres: la escala del proyecto que en otras palabras depende del número de estudiantes, el área construida y la ubicación dentro de la ciudad.

3.2. Cálculo de oferta de estacionamiento a partir de estudios de rotación

Los estudios de tránsito con los cuales se aprobaron los planes de regularización y manejo de las universidades seleccionadas permiten ver el cálculo de la demanda de estacionamiento en HMD bajo la misma técnica: el estudio de rotación de estacionamiento. Ver Tabla 4.

Las variables que inciden en la planificación del estacionamiento para este caso son tres: cantidad de vehículos que llegan al estacionamiento, tiempo de entrada y salida de cada vehículo y capacidad del estacionamiento.

3.3. Cálculo de oferta de estacionamiento a partir de la metodología Eno “Center For Transportation”

La manera de establecer las necesidades de estacionamiento a partir de la metodología propuesta por el ENO se resume en la fórmula algebraica expresada en la Ecuación 2 y cada variable es explicada en la Tabla 5 donde se calcula la oferta de estacionamiento para los campus seleccionados, discriminando entre estudiantes y personal universitario (entiéndase profesores, administrativos y visitantes).

$$\text{Necesidades de espacio de estacionamiento } P \times C \times W \times F \times A \quad (2)$$

Tabla 3. Oferta de estacionamiento en campus seleccionados según RME

| Parámetro | | Andes | Nacional |
|-----------|--|------------------------|-----------------------|
| A | Estudiantes | 17,123 | 29,788 |
| B | Escala universidad | Metropolitana | Metropolitana |
| C | Ubicación en ZNDE | C | B |
| D | Factor de oferta por ZNDE | 1 x 100 m ² | 1 x 60 m ² |
| E | Área construida (m ²) | 163,370 | 398,316 |
| F | Factor área generadora | NA | 69.59% |
| G | Áreas administrativas (m ²) | 11,687 | 25,633 |
| H | Área generadora visitantes (m ²) | 126,383 | 277,194 |
| I | Estacionamientos privados = G / 100 (factor D) | 117 | 427 |
| J | Estacionamientos visitantes = H / 100 (factor D) | 1,264 | 4,620 |
| K | Estacionamientos totales = I + J | 1,381 | 5,047 |

Tabla 4. Oferta de estacionamiento en campus seleccionados según estudio de rotación

| Parámetro | Andes | Nacional |
|--|-------------|-------------|
| Total vehículos (Ntt) | 846 | 5,468 |
| Duración de estacionamiento min. (De) = $60 \cdot (N_{th}/N_{tt})$ | 334 | 239 |
| Capacidad (Qc) | 463 | 1,600 |
| Índice de rotación (Ir) = N_{tt} / Q_c | 1.83 | 3.42 |
| Índice de rotación horaria (Irh) = (I_r / T_h) | 0,14 | 0,23 |
| Entrada máxima horaria | 138 | 684 |
| Ocupación máxima horaria | 395 | 1.516 |
| Fecha del estudio de rotación de placas | 17/Nov/2010 | 14/Mar/2012 |

Tabla 5. Oferta de estacionamiento en campus seleccionados según metodología ENO

| Parámetros estudiantes | | Estudiantes | | Personal | |
|------------------------|---|-------------|----------|----------|----------|
| | | Andes | Nacional | Andes | Nacional |
| P | Población total en el día | 17,123 | 29,788 | 2,856 | 4,648 |
| C | % de población que no son considerados dentro del otro grupo poblacional | 1.000 | 1.000 | 1.000 | 1.000 |
| W | % de la población total que se espera llegue durante el día laborable pico de 07:00 a 16:00 horas | 0.849 | 0.834 | 0.849 | 0.834 |
| F | Factor de acumulación en la hora pico para población que utiliza autos en las instalaciones | 0.672 | 0.672 | 0.672 | 0.672 |
| A | % de población que llega como conductor | 0.280 | 0.092 | 0.348 | 0.635 |
| R | Cupos de estacionamiento | 2,736 | 1,535 | 568 | 1,653 |

Considerando que según esta metodología se debe adicionar un 10% de estacionamientos para los visitantes a partir del resultado obtenido para el personal universitario, se obtiene que el total de oferta es de $2,736 + 568 + 57 = 3,360$ estacionamientos para la UA y de $1,535 + 1,653 + 165 = 3,353$ estacionamientos para la UN.

Las variables que inciden en la planificación del estacionamiento para este caso son cinco: población total de estudiantes, población total de personal universitario, asistencia de la población universitaria en un día laborable, factor de acumulación vehicular en la hora pico y porcentaje de estudiantes y administrativos que llegan en vehículo al campus

Tabla 6. Oferta de estacionamiento en campus seleccionados según metodología ITE

| Parámetro | | Andes | Nacional |
|-----------|--|--------|----------|
| A | Localización | Urbana | Urbana |
| B | Población universitaria | 19.979 | 34.436 |
| C | Espacios de estacionamiento por fórmula = 0,22 X B | 4.395 | 7.576 |

3.4. Cálculo de oferta de estacionamiento a partir de metodología Institute of Transportation Engineers

La manera de establecer las necesidades de estacionamiento a partir de la metodología propuesta por el ITE (1982) se resume en la fórmula algebraica de la Ecuación 3. En la Tabla 6 se calcula la oferta de estacionamiento para los campus seleccionados.

$$\text{Vehículos estacionados en la HMD} = 0,22 \times \text{población universitaria} \quad (3)$$

Las variables que inciden en la planificación del estacionamiento para este caso son dos: localización dentro de área urbana o suburbana de la ciudad y población universitaria (total de estudiantes, profesores y administrativos).

4. PLANIFICACIÓN DEL ESTACIONAMIENTO BAJO ENFOQUES NO TRADICIONALES

En seguida se muestra el procedimiento realizado para efectuar el análisis de la planificación del estacionamiento bajo enfoques no tradicionales o bajo el nuevo paradigma de la planificación. Como fue planteado en la metodología del trabajo se pretende examinar cuáles son las variables más representativas y las estrategias TDM que pueden contribuir con el objetivo de reducir la demanda de estacionamientos en ambos campus universitarios.

Para este fin se conformó una encuesta para los usuarios del estacionamiento de cada campus universitario agrupando variables relacionadas con el entorno físico, con el usuario, el viaje, la oferta de transporte y las estrategias TDM. Dicha encuesta tenía dos tipos de preguntas: a) de preferencia revelada para recoger información relacionada con las características del usuario, el viaje, la oferta de transporte y el entorno físico; b) de preferencia declarada para recoger información relacionada con la disposición a usar las estrategias TDM y cambiar el vehículo como medio de transporte al campus.

Las estrategias TDM que se consideraron en la encuesta, a partir de la revisión de la literatura, que estuvieran al alcance de la administración de la universidad y la administración distrital, y considerando una encuesta de fácil aplicación, fueron las siguientes:

- TDM 1: suministrar transporte público exclusivamente a la población universitaria en horas pico con intervalos de 30 minutos, administrado por la universidad.

- TDM 2: cobrar por el estacionamiento una tarifa plana de \$1,000 hora (pesos colombianos)
- TDM 3: cobrar por el estacionamiento una tarifa plana de \$3,000 hora (precio promedio del mercado en el área de influencia ó \$50 minuto).
- TDM 4: promocionar el carpooling (viaje compartido en automóvil) con miembros de la comunidad universitaria y con un incentivo en la reducción de la tarifa del estacionamiento.
- TDM 5: subsidiar un pasaje diario del transporte público.
- TDM 6: subsidiar dos pasajes diarios del transporte público.
- TDM 7: aumentar o mejorar la oferta del Sistema Integrado de Transporte Público de la ciudad hacia el campus, con servicios que finalicen su recorrido alrededor del campus.
- TDM 8: implementar un sistema de préstamos de bicicletas gratuito para transportarse desde el hogar al campus.
- TDM 9: modificar el horario de inicio de actividades de la universidad a una hora antes del período de mayor congestión de la ciudad, es decir, a las 06:00 am.
- TDM 10: modificar el horario de inicio de actividades de la universidad a una hora después del período de mayor congestión de la ciudad, es decir, a las 09:00 am.
- TDM 11: implementar cicloparqueaderos cubiertos, vigilados y con duchas adecuadas para motivar los viajes a pie y en bicicleta.

Una vez depurada la encuesta se establecieron relaciones primarias para las variables más importantes de análisis asociadas al usuario, que se encontraron primordiales en otras universidades de acuerdo a la literatura revisada (género, edad y población universitaria) y una serie de relaciones secundarias entre las demás variables.

Para analizar la relación que tienen las variables con la aceptación de estrategias TDM y el cambio modal de viaje hacia y desde el campus en cada universidad, se hizo uso de la técnica estadística denominada análisis de correspondencias múltiple (ACM) que hace parte de los métodos de interdependencia, los cuales “buscan el cómo y el por qué se relacionan o asocian un conjunto de variables” (Díaz y Morales, 2011), que resulta muy adecuado cuando las variables son de tipo categóricas y cuando se quieren relacionar más de dos variables. Para esto, se utilizó el “software” IBM SPSS Statistics (“Statistical Package for the Social Sciences”) para la organización de datos y para generar los análisis de correspondencias.

En esta técnica las filas se consideran como individuos o grupos humanos y las columnas son las respuestas a cada una de las estrategias TDM conformando tablas de contingencia que pueden ser representadas a través de gráficos en donde se ubican coordenadas en ejes denominados “dimensiones” que explican la asociación entre las filas y las columnas (medida mediante un coeficiente ji-cuadrado). Algunas de las reglas de interpretación de estos gráficos o mapas perceptuales según Díaz y Morales (2011) son:

- Las modalidades con participación baja aparecen más alejadas del origen que las modalidades de mayor frecuencia.
- La proximidad entre modalidades de variables diferentes significa asociación.
- La proximidad entre modalidades de una misma variable significa semejanza.

El ACM elaborado entre la variable género y las respuestas a todas las estrategias TDM indica que en la UA no existen diferencias importantes en el género para la aceptación de las estrategias TDM, en cambio, en la UN se puede apreciar que existe una ligera mayor disposición por parte del género masculino hasta en un 34% de aceptación (en la Figura 2 se puede ver la cercanía entre el punto que representa este género y la nube de puntos asociados a “estar dispuesto”). En términos comparativos, tanto los hombres como las mujeres pertenecientes a la UN presentan una mayor aceptación de las estrategias TDM planteadas con respecto a los hombres y las mujeres de la UA.

El ACM elaborado entre la variable edad y las respuestas a todas las estrategias TDM indica que en la UA los jóvenes están más dispuestos al cambio modal, seguidos de los adultos entre 25 y 45 años, y posteriormente de los adultos entre 45 y 60 años. Como los jóvenes también presentan una alta indecisión e indiferencia con las estrategias TDM se puede apreciar en la Figura 3 una ubicación intermedia de esta categoría entre la nube de puntos 2 y 3. Por su parte, en la UN siguen siendo los jóvenes quienes presentan mayor disposición al cambio, pero esta vez seguidos de los adultos entre 45 y 60 años, y posteriormente de los adultos entre 25 y 45 años. En ambas universidades el menor nivel de aceptación al cambio modal lo registra el grupo poblacional correspondiente al adulto mayor. Los jóvenes de la UN presentan una mayor disposición al cambio en comparación con los jóvenes de la UA.

El ACM elaborado entre la variable tipo de población universitaria y las respuestas a todas las estrategias TDM indica que en la UA son los estudiantes de pregrado quienes están más dispuestos al cambio modal, seguido de los administrativos, y posteriormente, se ubican con un porcentaje similar los profesores y los estudiantes de posgrado. Por su parte, en la UN siguen siendo los estudiantes de pregrado quienes presentan mayor disposición al cambio, pero esta vez equiparados con los estudiantes de posgrado (por eso se ubican cerca en la Figura 4 y orientados hacia la nube de puntos 3). Posteriormente, se ubican con un porcentaje similar los profesores y administrativos. Los estudiantes de pregrado de la UN presentan una mayor disposición al cambio en comparación con los estudiantes de pregrado de la UA.

La efectividad de las estrategias TDM en la UA y en la UN indica que la propuesta N°1 (implementar servicios de transporte público exclusivo para la población universitaria durante los períodos pico con intervalos de 30 minutos) y la N°4 (promocionar el “carpooling” entre la población universitaria con un subvención en la tarifa) son las más determinantes para generar un cambio modal del automóvil hacia maneras alternativas de transporte. Ambas propuestas llegan a un 50% de aceptación por parte de los encuestados en ambos campus, que puede traducirse en un 50% de disminución de necesidades de

estacionamiento. En la UA no existen propuestas TDM adicionales que generen por lo menos un 40% de efectividad, en cambio, en la UN se encuentra que las estrategias TDM N°6 (subsidiar dos pasajes diarios del transporte público), y N°7 (aumentar o mejorar la oferta del Sistema Integrado de Transporte Público SITP de la ciudad hacia el campus, con rutas que finalicen su recorrido en las inmediaciones del campus) alcanzan porcentajes moderados de aceptación por encima del 40%. Ver Figura 5.

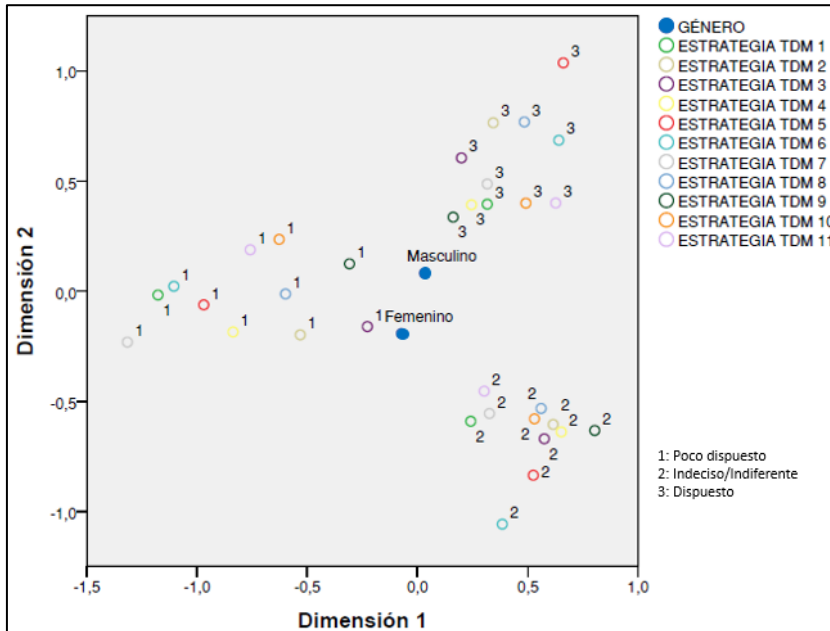


Figura 2. Respuesta al cambio modal según variable primaria género UN

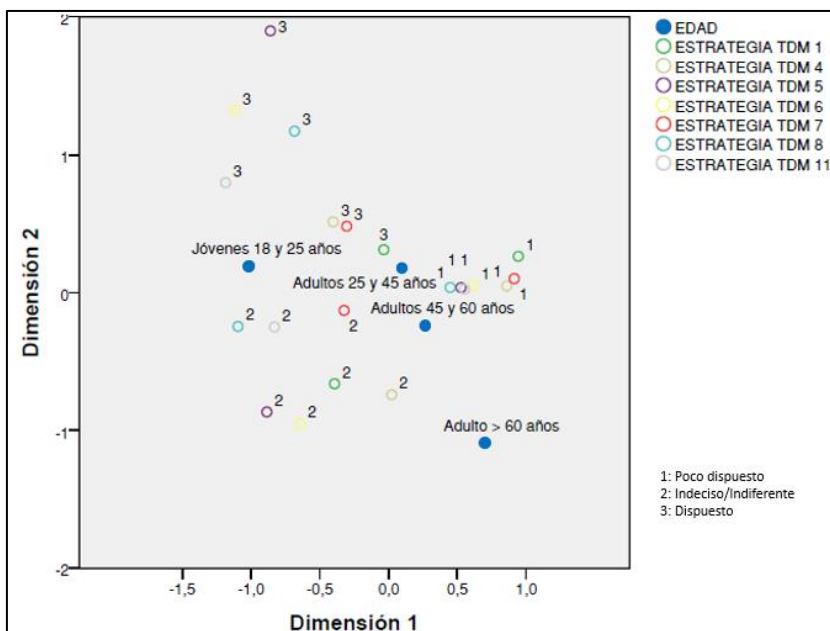


Figura 3. Respuesta al cambio modal según variable primaria edad UA

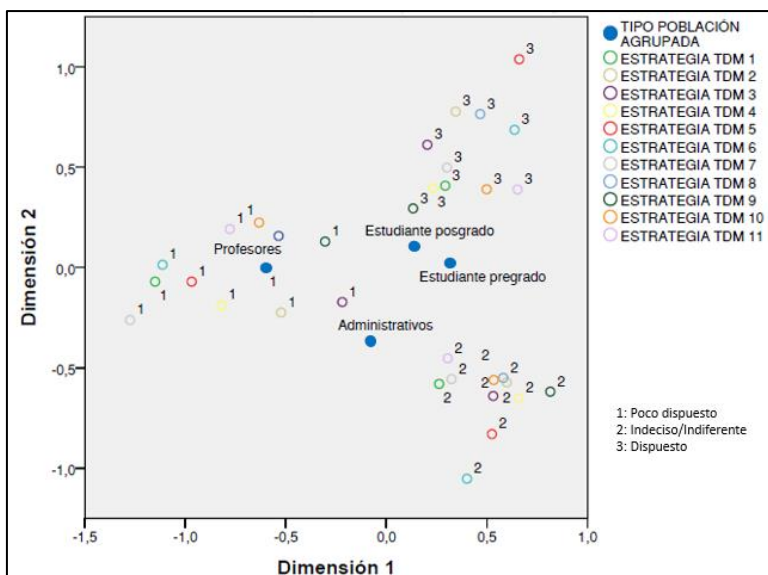


Figura 4. Respuesta al cambio modal según variable primaria tipo población UN

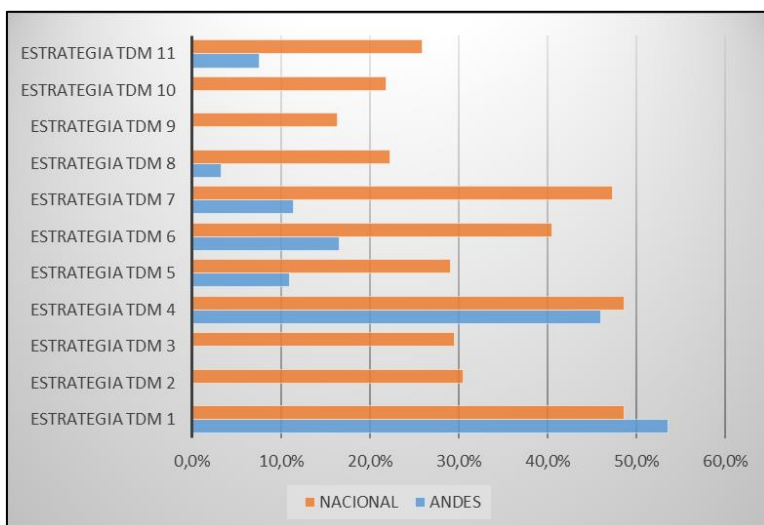


Figura 5. Efectividad estrategias TDM en campus seleccionados

5. DISCUSIÓN

Los distintos métodos aplicados para planificar la oferta de estacionamiento en el marco de los enfoques tradicionales resultaron en una exigencia diversa de cupos pero que siempre generó excedentes o sobreofertas en comparación con el valor pico de demanda registrado en el estudio de rotación de estacionamiento. La sobreoferta para la UA resultó entre un 350% y 1,113%, mientras que para la UN se ubicó entre 221% y 500%. Suponiendo estacionamiento superficial se obtienen necesidades de áreas entre el 39% y 124% con referencia a la extensión del campus de la UA, y del 7% al 17% con referencia a la extensión del campus de la UN. Ver Tabla 7.

Tabla 7. Cupos y sobreoferta en campus seleccionados metodologías tradicionales

| Metodología | Andes | | | | Nacional | | | |
|---------------------|-------|--------------|----------------------------------|------------------------|----------|--------------|----------------------------------|------------------------|
| | Cupos | Sobre oferta | Área necesaria (m ²) | Porcentaje área campus | Cupos | Sobre Oferta | Área necesaria (m ²) | Porcentaje área campus |
| Decreto 190 de 2004 | 1,381 | 350% | 38,668 | 39% | 5,047 | 333% | 141,316 | 11% |
| ENO | 3,360 | 851% | 94,080 | 95% | 3,353 | 221% | 93,884 | 7% |
| ITE | 4,395 | 1,113% | 123,060 | 124% | 7,576 | 500% | 212,128 | 17% |

La sobreoferta se calculó con base en la hora de mayor ocupación del estacionamiento en un día hábil, lo cual implica que el excedente de oferta es superior para las demás horas del día debido a que el número de espacios vacíos disponibles aumenta en esos períodos. Adicional a lo anterior, como se mostró en el capítulo 2.2, también se ha encontrado que en la HMD resulta un remanente de espacios dado que los campus tienen una mayor capacidad que la demanda pico. Las variables de análisis en el caso de las metodologías tradicionales responden principalmente a la infraestructura, la oferta y el tránsito vehicular.

Por su parte, la encuesta elaborada a los usuarios de los estacionamientos de ambos campus seleccionados permitió identificar que existen relaciones entre las variables asociadas al usuario como el género, la edad y el tipo de población universitaria, y la decisión modal de viaje hacia el campus. También que la implementación de estrategias TDM puede contribuir de manera significativa en reducir la demanda de estacionamiento y en generar un cambio modal desde el automóvil hacia medios alternativos en estas universidades.

Los análisis de correspondencias permitieron identificar que las estrategias TDM no son efectivas para toda la población universitaria. Son los jóvenes menores a 25 años y los estudiantes de pregrado quienes en ambos campus presentan una mayor disposición al uso de estas estrategias, mientras que serán poco efectivas en profesores. Esto es importante pues permite identificar aspectos que harán más rentable la adopción de medidas TMD en estos campus considerando que la mayor parte de la población corresponde a grupos jóvenes y estudiantes.

Lo anterior implica que la planificación del estacionamiento debe ser entendida como una parte no aislada del sistema de transporte en donde tienen importancia variables propias del usuario y cambios en la oferta. Así mismo se entiende que el área construida y los RME no son necesariamente las variables más representativas para explicar dicha demanda.

Por último, la investigación permitió identificar varias deficiencias de tipo estructural en la forma convencional de planificar el estacionamiento y que existen posibilidades para ajustar

dicha planeación en las políticas de movilidad sostenible que predicen las ciudades contemporáneas.

REFERENCIAS

- AOUN, A., ABOU-ZEID, M., KAYSI, I., Y MYNTTI, C. (2013). *Reducing parking demand and traffic congestion at the American University of Beirut*. *Transport Policy*, XXV, 52-60.
- BARATA, E., CRUZ, L., Y FERREIRA, J.-P. (2011). *Parking at the UC campus: Problems and solutions*. *Cities*, XXVIII, 406-413.
- CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL. (2010). *Conpes 3677. Conpes de movilidad integral para la región Bogotá*. Cundinamarca. Bogotá.
- DELMELLE, E. M., Y DELMELLE, E. C. (2012). *Exploring spatio-temporal commuting patterns in a university environment*. *Transport Policy*, XXI, 1-9.
- DÍAZ MONROY, L. G., Y MORALES RIVERA, M. A. (2011). *Estadística multivariada: inferencia y métodos*. Bogotá, Colombia: Editorial Universidad Nacional de Colombia.
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (2006). *Parking spaces / Community Places. Finding the balance through smart growth solutions*. Washington.
- LITMAN, T. A. (2011). *Parking Management. Strategies, Evaluation and Planning*. Victoria, Canadá: Victoria Transport Policy Institute.
- MOEINADDINI, M., ASADI-SHEKARIA, Z., ISMAILB, C. R., Y ZALY SHAHA, M. (2012). *A practical method for evaluating parking area level of service*. *Land Use Policy*, XXIII, 1-10.
- MOGREN, E., Y SMITH, W. (1952). *Zoning and Traffic*. Saugatuck: Eno Foundation.
- MONROE COUNTY DEPARTMENT OF PLANNING AND DEVELOPMENT. (2007). *Statistical analyses of parking by land use*. Rochester, New York.
- PINEDA, M., Y ABADIA, X. (2011). *Criterios de movilidad. El estacionamiento urbano en superficie. Orientaciones para la definición de políticas locales de movilidad*. Barcelona, España: Fundación RACC.
- SHANNON, T., GILES-CORTI, B., PIKORA, T., BULSARA, M., SHILTON, T., Y BULL, F. (2006). *Active commuting in a university setting: Assessing commuting habits and potential for modal change*. *Transport Policy*, XIII, 240-253.
- SHOUP, D. (2005). *The high cost of free parking*. Chicago IL: American Planning Association.
- URBAN LAND INSTITUTE. (1985). *Shared parking*. Washington D.C.: The Urban Land Institute.
- WEANT, R. A., Y LEVINSON, H. S. (1990). *Parking*. Washington D.C.: Eno Foundation for Transportation.
- WEINBERGER, R., KAEHNY, J., Y RUFO, M. (2012). *Políticas Estadounidenses de Estacionamiento: una visión general de las estrategias de gestión*. New York, NY: Instituto de Políticas para el Transporte y el Desarrollo.
- WHITLOCK, E. M. (1982). *Parking for institutions and special events*. Connecticut: Eno Foundation for Transportation.

ZHOU, J. (2012). *Sustainable commute in a car-dominant city: Factors affecting alternative mode choices among university students*. *Transportation Research Part A*, XLVI, 1013-1029.

47 La utilización de la teoría de autómatas celulares para la predicción del cambio de uso del suelo y la influencia de la red vial. Caso de estudio: Santo Tomás y San Miguel Ajusco, D.F., México

Gustavo Camacho Palacios

Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería. México

RESUMEN

En el pueblo del Ajusco, formado por las comunidades de Santo Tomás y San Miguel y sus alrededores, en la Delegación Tlalpan en la Ciudad de México, hay un crecimiento acelerado del área urbana sobre áreas de conservación ecológica que se compone principalmente de zonas agrícolas y forestales, lo que implica que hay un cambio no planificado en el uso del suelo. El objetivo principal de este trabajo es predecir el crecimiento urbano y el cambio de uso de suelo en el pueblo del Ajusco.

Es posible modelar y simular el crecimiento urbano y los cambios de usos del suelo en el pueblo de Ajusco, a través de la teoría de los autómatas celulares, considerando: (1) la conveniencia del uso del suelo, (2) el efecto que tiene sobre un uso de suelo específico, la existencia de distintos usos de suelo aledaños y (3) el factor de la red vial.

Como resultado del trabajo, se crearon escenarios de los cambios de uso de suelo a corto y mediano plazo con alto grado de certeza, los cuales pueden ser usados como herramientas para la planificación y creación de un plan parcial de desarrollo urbano del Pueblo del Ajusco.

Palabras clave: Autómatas celulares, predicción, cambio, usos de suelo.

1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes teorías y modelos que explican el fenómeno del cambio de uso del suelo; unos se centran en aspectos sociales, económicos, políticos, normativos, físicos o ambientales, dejando de lado las interrelaciones que se dan entre ellos. Por ejemplo, se tiene el enfoque microeconómico, con la teoría de la Renta del Suelo Agrícola y la teoría del Mercado del Suelo Urbano; el enfoque teórico Físico-Social; el enfoque teórico Funcionalista-Conductista con la teoría de zonas concéntricas; del enfoque teórico basado en las Ciencias Naturales se puede nombrar a las teorías antropológicas y geográficas, medio ambientales/culturales o estructuralismo, entre otros.

En el presente trabajo se propone utilizar el enfoque teórico de los autómatas celulares (que son parte de las ciencias de la complejidad), para explicar el fenómeno del cambio de uso del suelo. Este enfoque se basa en las decisiones individuales de los elementos básicos, las relaciones entre ellos y su entorno y determina el nivel de influencia que puede incluir distintos aspectos, como los sociales, económicos, políticos, normativos, físicos y/o ambientales; este enfoque es conveniente para comprender el fenómeno a nivel espacial y temporal, permitiendo visualizar su evolución en el espacio geográfico de una manera explícita a través de una representación gráfica (mapa).

Para realizar un modelo de una ciudad se requiere representar dos aspectos como mínimo:

- Las unidades de la infraestructura, los servicios y el equipamiento de la ciudad que se consideran fijos, como la red vial o los edificios.
- Los movimientos de los individuos dentro de las ciudades que hacen uso de la infraestructura, servicios y mobiliarios, y que tienen en principio, libre albedrío, por ejemplo, para cambiar el uso de suelo de su propiedad, de trabajo, de casa, entre otros aspectos.

Una manera de crear un modelo de simulación que implique la interacción de estos dos aspectos es mediante el uso de la teoría de autómatas celulares. En estos modelos se considera que el marco espacial en el que los actores urbanos se desenvuelven es una malla compuesta por celdas. Así los actores urbanos son entendidos como objetos computacionales autónomos que tienen la capacidad de tomar decisiones para realizar ciertas acciones, percibiendo su entorno y comunicándose unos con otros para cambiar de estados.

2. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método consistió en el cálculo de probabilidades de cambio de uso del suelo para cada célula del área de estudio, utilizando el modelo White (1996). Una vez que todos los potenciales de transición se calculan (probabilidad), cada célula se convierte en el estado para el que tiene el mayor potencial (uso del suelo). En el modelo de White, los estados celulares representan los distintos usos del suelo, definidos en un espacio celular finito.

Se definen dos clases de estados, los que pueden cambiar, que se utilizan para representar el suelo activo, como el suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral y agroforestal y los estados que son fijos, utilizados para representar las características que se consideran permanentes, tales como ríos, parques y vías de comunicación (carreteras y vías férreas). Aunque las células fijas no pueden cambiar, si pueden afectar las probabilidades de transición de los estados activos, como lo hace la cercanía a vialidades.

En cada iteración, para cada celda que no esté ocupada por un estado fijo, se calcula un conjunto de potenciales de transición, uno por cada estado en el que podría en principio, convertirse la célula, incluyendo el estado actual de la célula.

Estos potenciales de transición reflejan la aptitud intrínseca de la célula para cada uno de los usos de suelo activos y el efecto agregado de los diferentes usos del suelo de las células vecinas, algunos usos del suelo pueden ser incompatibles como vecinos, otros se refuerzan mutuamente.

De acuerdo a Aguilera (2002), las reglas de transición de estado se definen mediante una función que relaciona cuatro tipos de factores:

1. Las conveniencias intrínsecas entre los distintos usos de suelo, las cuales representan inhomogeneidades en el espacio geográfico que está siendo modelado, conveniencias para que un uso de suelo, localizado en un punto específico, se transforme en otro o permanezca sin cambio están relacionadas con cuestiones que van desde la calidad del suelo hasta restricciones legales o presiones económicas especulativas. Es el parámetro s_j en el modelo de White.
2. El efecto que tiene sobre un uso de suelo específico la existencia de distintos usos de suelo aledaños. Este tipo de efecto puede ser atractivo o repulsivo, ya que algunos tipos de suelo atraen a unos y repelen a otros. Por ejemplo, un uso de suelo residencial atrae usos de suelo de tipo comercial en la vecindad, mientras que repele usos de suelo de tipo industrial.
3. El efecto de la accesibilidad local, que representa la facilidad de acceso a las vías de comunicación.
4. Una perturbación estocástica que captura el efecto del conocimiento imperfecto del sistema y las necesidades y gustos variantes entre los actores implícitos, cuyas decisiones repercuten sobre los usos del suelo.

La función calcula un vector de potenciales de transición para cada celda activa, tomándose el valor mayor de los potenciales calculados. Luego se aplica la regla de transición, cambiando el estado de cada celda al estado para el cual tiene el más elevado potencial.

Los potenciales se calculan de acuerdo a la ecuación 1, definida por White (1996):

$$P_{hj} = v * a_j * s_j * (1 + \sum_k \sum_i \sum_d m_{kd} * I_{id}) + H_j \quad (1)$$

Aguilera (2002) explica cada término de la siguiente manera:

- P_{hj} es el potencial de transición del estado h al estado j .
- m_{kd} es un parámetro de peso aplicado a las celdas con estado k y una distancia d a la celda central. Usualmente, las celdas más cercanas a la celda central tienen un peso mayor que las alejadas. Sin embargo, los pesos pueden ser positivos si los estados son compatibles, mientras que se recomienda utilizar valores negativos de los pesos cuando los estados son antagónicos.

- $I_{id} = 1$ si el estado de la celda $i = k$, de otro modo $I_{id} = 0$, donde i es el índice de la suma de las celdas situadas dentro de un radio d a la celda central (la función de I_{id} es asegurar que se contabilicen los pesos de las celdas (m_{kd}) localizadas en la posición i, d que tengan el estado k).
- H_j es un parámetro inercial, $H_j > 0$ si $j = h$, de otra forma $H_j = 0$ (H_j incrementa la probabilidad de que una celda permanezca en su estado actual).
- s_j es la conveniencia del estado de la celda de j , donde $0 \leq s_j \leq 1$.
- a_j es el parámetro de accesibilidad, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$a_j = \left(1 + \frac{D}{\delta_j}\right)^{-1}$$

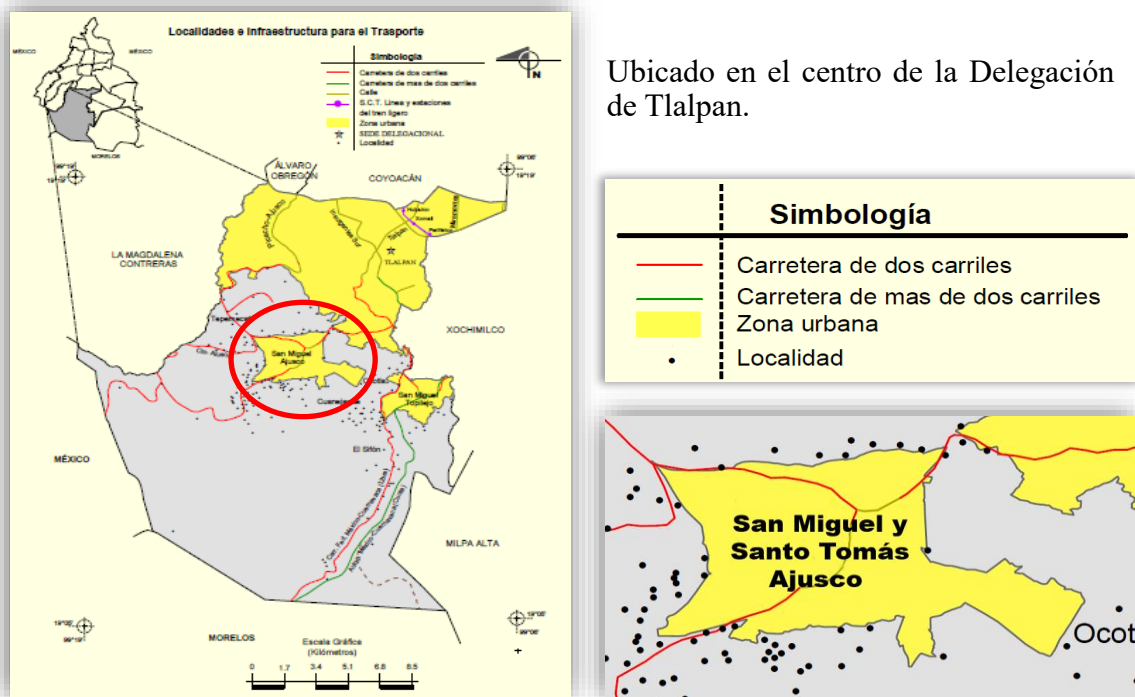
- donde D es la distancia euclidiana medida desde la celda central hasta la celda fija (una celda fija es aquella que tiene estados fijos) más cercanos. δ_j es un coeficiente de accesibilidad, el cual expresa la relevancia que tiene la accesibilidad de la celda para que se dé el uso del suelo j . En este caso si δ_j se acerca a 1 significa que la accesibilidad es muy relevante para el uso de suelo, en nuestro caso, el uso de suelo que se acerca más a 1 es el uso de suelo urbano. $D = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}$
- v es un término estocástico de perturbación, en donde $v = 1 + (-\ln(r))^\alpha$. En donde α es un parámetro que permite controlar el tamaño de la perturbación. En esta última ecuación r es una variable aleatoria uniforme que varía de 0 a 1.
- k es el índice de la sumatoria que corre sobre los distintos estados (usos de suelo).
- j es el estado inicial de la celda referenciada sobre la que está realizando el cálculo.
- $\sum_k()$ es la suma sobre los diferentes tipos de usos de suelos.
- $\sum_i()$ es la suma sobre el total de las celdas que se considerará.
- $\sum_d()$ es la suma entre los diferentes “anillos” que rodean a la celda central.

Como $P_{hj} > 0$, excepto cuando $s_j = 0$, cada célula activa en la matriz tiene una probabilidad distinta de cero de la transición, excepto para el estado prohibido por una adecuación $s_j = 0$. Los coeficientes permiten que las células dentro de un vecindario se ponderen de forma diferente dependiendo de su estado y su distancia de la celda de referencia.

El sistema de comunicación (calles y carreteras) se representa como un uso del suelo de estado fijo, para unos usos del suelo tiene una acción de atracción (aumenta su posibilidad) o de repulsión (disminuye su posibilidad), de acuerdo a los parámetros de ponderación utilizados en la ecuación o modelo de White.

3. CASO DE ESTUDIO: SANTO TOMÁS Y SAN MIGUEL AJUSCO

El pueblo del Ajusco que se compone por las comunidades de los pueblos de Santo Tomás y San Miguel, que se localizan en la parte central de la delegación de Tlalpan (Mapa 1).



Ubicado en el centro de la Delegación de Tlalpan.

Mapa 1. Localización del pueblo del Ajusco en la Delegación de Tlalpan.

Fuente: INEGI - Prontuario de información geográfica delegacional de los Estados Unidos Mexicanos, Tlalpan, Distrito Federal

Se analizará el pueblo de Ajusco porque existe la conversión en sus usos de suelo, debido principalmente al acelerado crecimiento del área urbana sobre suelo de preservación ecológica (agrícola, forestal, pastizal y matorral).

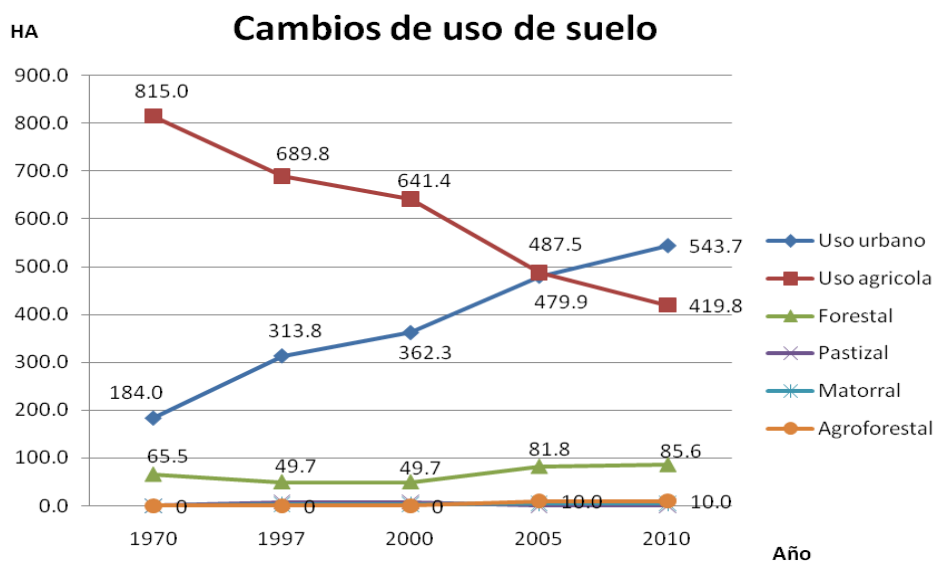
3.1 Cambios de uso del suelo en los años 1970, 1997, 2000 y 2005 en el pueblo del Ajusco

En la Tabla 1 y Gráfica 1 se hace un resumen de los cambios de uso del suelo que ha tenido la zona de estudio desde el año de 1970 hasta el año 2010. Resaltan los datos de los usos del suelo urbano y agrícola. En el año de 1970 el uso urbano ocupaba el 17.3% del área de estudio contra el 76.6% de uso agrícola, mientras que para el año de 2005 el uso urbano tenía el 45.1% y el agrícola el 45.8%, es decir, estos dos usos alcanzaron en 35 años porcentajes similares de superficie, lo que indica la pérdida de la actividad económica principal de la zona (agrícola) y el aumento del área urbana.

Tabla 1. Usos de suelo en el pueblo del Ajusco en 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010

| Usos | 1970 | | 1997 | | 2000 | | 2005 | | 2010 | |
|--------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| | Ha | % | Ha | % | Ha | % | Ha | % | Ha | % |
| Urbano | 184.0 | 17.3 | 313.8 | 29.5 | 362.3 | 34.0 | 479.9 | 45.1 | 543.7 | 51.0 |
| Agrícola | 815.0 | 76.6 | 689.8 | 64.8 | 641.4 | 60.3 | 487.5 | 45.8 | 419.8 | 39.5 |
| Forestal | 65.5 | 6.2 | 49.7 | 4.7 | 49.7 | 4.7 | 81.8 | 7.7 | 85.6 | 8.0 |
| Pastizal | 0.0 | 0.0 | 7.8 | 0.7 | 7.8 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| Matorral | 0.0 | 0.0 | 3.0 | 0.3 | 3.0 | 0.3 | 4.9 | 0.5 | 4.9 | 0.5 |
| Agroforestal | - | - | - | - | - | - | 10.0 | 0.9 | 10.0 | 0.9 |

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la PAOT

**Gráfica 1. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010**

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la PAOT

En 2010, el área del uso de suelo urbano ya es más de la mitad de toda la superficie, con un 51.0 % y el uso agrícola tiene el 39.5% de la zona de estudio, lo que puede indicar un cambio en las actividades económicas. En el Programa Delegacional de Desarrollo Urbano del 2010 de la Delegación de Tlalpan, se consideraba todavía la zona de estudio como Pueblo Rural.

3.2 Modelo

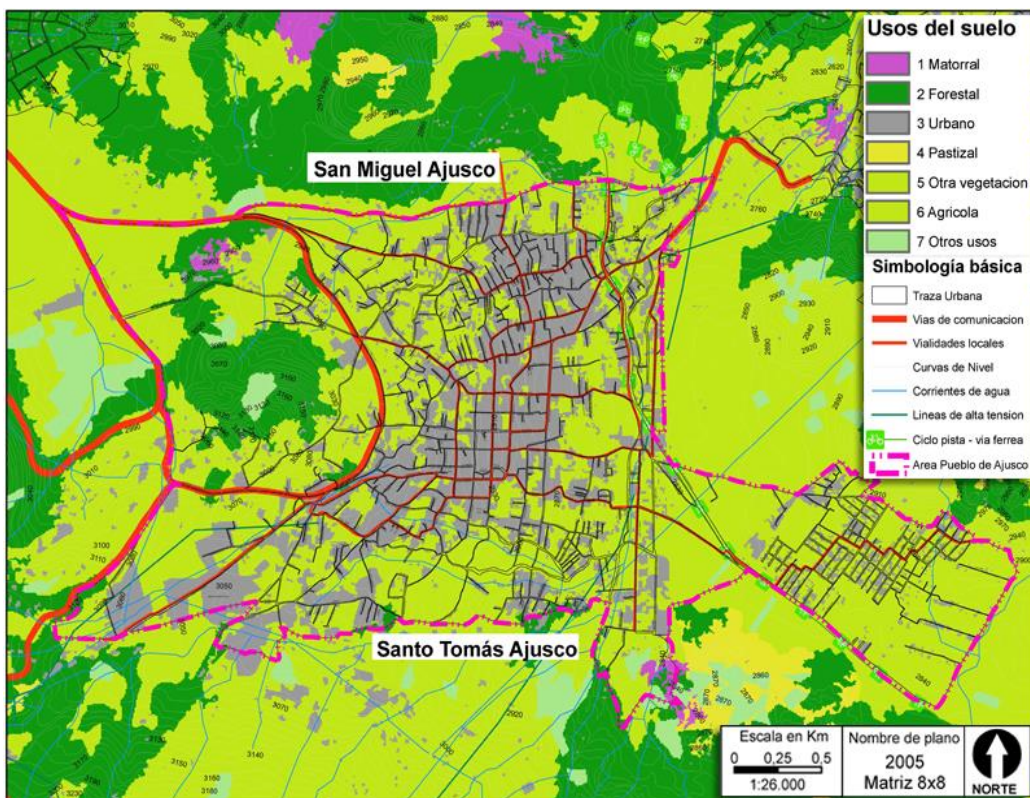
A continuación, se describe el procedimiento que se llevó a cabo para el modelado. El primer aspecto que se debe definir del autómata celular es el espacio celular del mismo (Mapa 2).

Además de delimitar el área para el espacio celular, es necesario definir el tamaño de la célula. En este caso, se va a utilizar una célula de 8 por 8 metros, debido principalmente a la

resolución de las vialidades, ya que si se utilizaba una célula de mayor tamaño el efecto de empaste era muy grande y se perdían detalles en los usos de suelo de la zona central (Imagen 2).

El segundo aspecto es el conjunto de estados, definido por los tipos de usos del suelo del área de estudio que se determinaron en el año de 2005. Así, los estados dinámicos son los usos: urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, otra vegetación y otros. Los estados estáticos están determinados por la red vial de la zona.

Se determinó utilizar la vecindad del tipo Moore extendida, con un radio de 6 y con un tamaño de la célula de 8 metros por 8 metros (Imagen 1).



Mapa 2. Definición del espacio celular

Fuente: Elaboración propia con base en datos de la PAOT

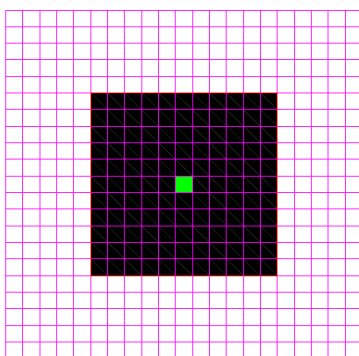


Imagen 1. Vecindad propuesta por Moore

La función de transición es la propuesta por Roger White, para el cálculo del potencial del cambio de uso del suelo.

Una vez que se determinaron los cuatro aspectos que definen al AC, es decir:

1. Espacio celular: área de 8000 metros por 6000 metros, con un tamaño celular de 8 metros por 8 metros, matriz de 1000 x 750 elementos.
2. Vecindad: Definida por un radio de 6 celdas de tipo Moore.
3. Estados: Usos del suelo urbano, agrícola, forestal, pastizal, matorral, agroindustrial (dinámicos) y vial (estático).
4. Función de transición: Función de White para el cálculo de probabilidad del cambio de uso de suelo.

Se procedió a la implementación del modelo de White, para ello, se utilizó el entorno de desarrollo de NetLogo para programar el modelo y generar la simulación. En la imagen 2 se muestra la interfaz desarrollada para el modelo del AC, en donde se implementaron los cuatro factores que intervienen el modelo de White.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Imagen 3 se muestra una comparativa a nivel visual de los planos del año 2010 real u observado y del año 2010 simulado o predicho, generado a partir del plano del año 2005 real.

Simulación para los años 2015 y 2020

Se muestran los resultados de la simulación para el 2015 y 2020 de los cambios de usos del suelo en la Tabla 2 en porcentaje y en las Imágenes 4 y 5, que pueden ser utilizadas como herramienta para una planeación a corto y mediano plazo.

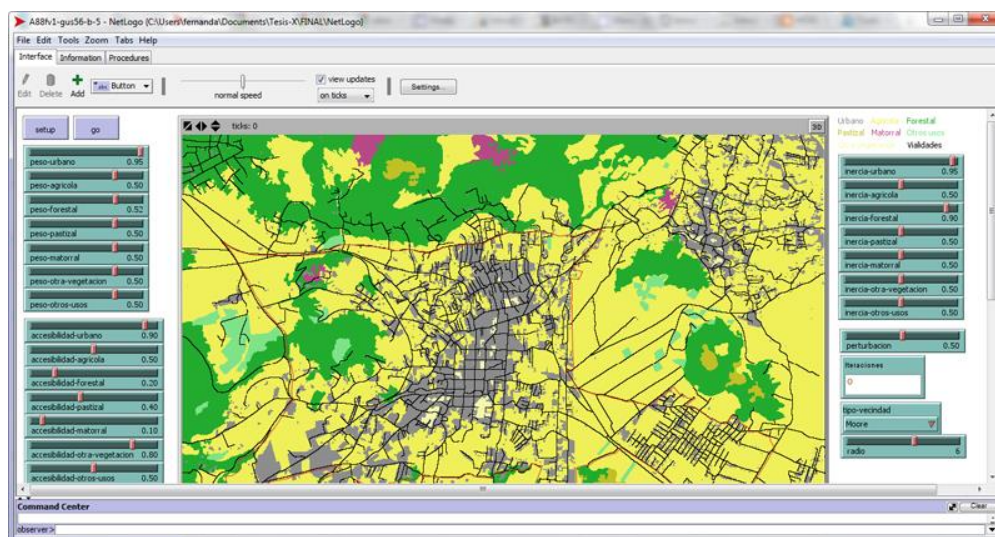
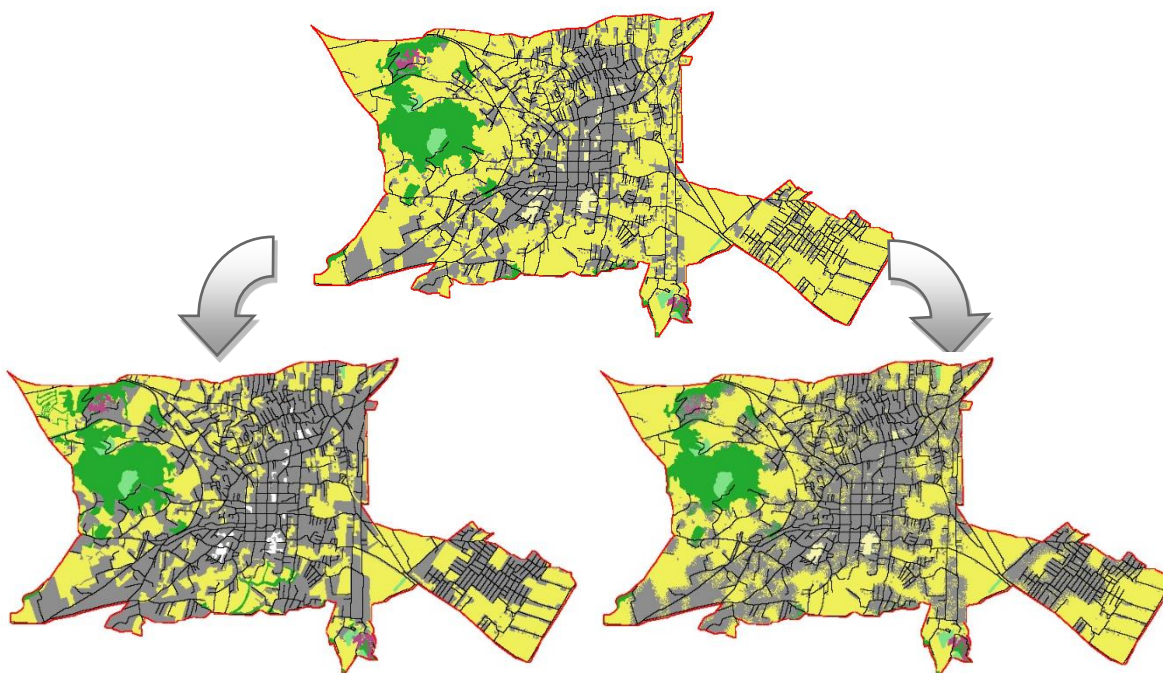


Imagen 2. Espacio celular de 8x8m y contorno del pueblo de Ajusco en NetLogo

Fuente: Elaboración propia

Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2005



Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2010. **Observada o real.**

Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2010. **Simulada o predicción.**

Imagen 3. Usos de suelo en SMSTA en 2010

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Cambios en los usos de suelo en 2010, 2015 y 2020

| Uso | Urbano simulado (%) | Agrícola simulado (%) | Forestal simulado (%) | Pastizal simulado (%) | Matorral simulado (%) | Agroforestal simulado (%) |
|------|---------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------------|
| 2010 | 50.4 | 41.4 | 6.3 | 0.0 | 0.3 | 0.9 |
| 2015 | 60.8 | 32.4 | 5.2 | 0.0 | 0.2 | 0.9 |
| 2020 | 69.4 | 25.0 | 4.2 | 0.0 | 0.2 | 0.9 |

Fuente: Elaboración propia

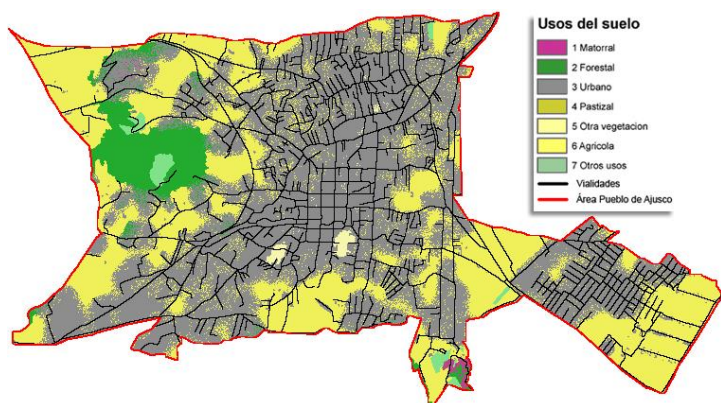


Imagen 4. Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2015

Fuente: Elaboración propia

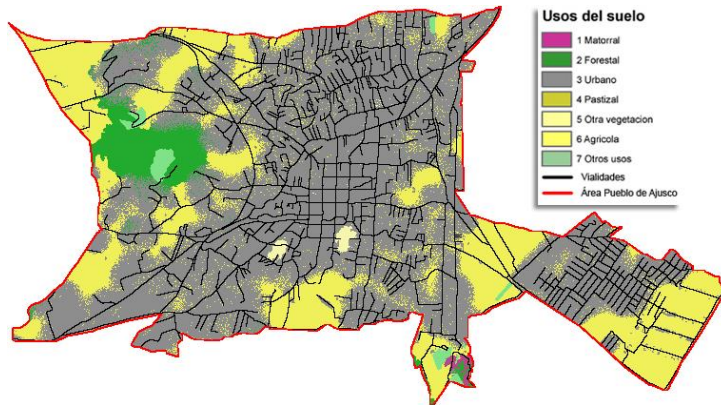
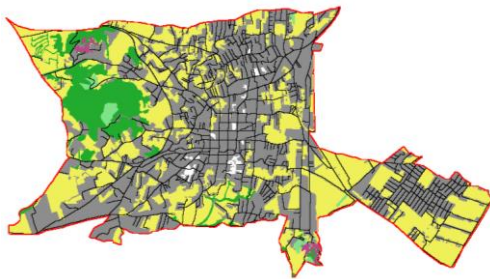


Imagen 5. Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2020

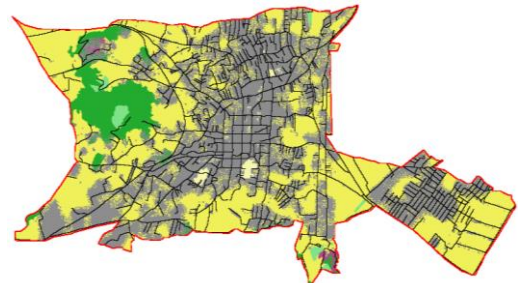
Fuente: Elaboración propia

Validación del modelo y la simulación

Visual: En la Imagen 6 se muestran los usos de suelo reales, estas zonas fueron creadas a partir de una imagen aérea del año 2010 y también se muestran los usos de suelo simulados a partir de los datos reales del año 2005.



Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2010. **Observada o real.**



Usos de suelo en Santo Tomás y San Miguel Ajusco en 2010. **Simulada o predicción.**

Imagen 6. Comparación visual del año 2010 real y simulada

Tendencial

En la sección anterior se dio una primera aproximación para medir la similitud entre los datos reales y los simulados de manera espacial, ahora se usará un enfoque cuantitativo, en donde se muestra una gráfica de las tendencias de los cambios de uso de suelo. En la Tabla 3 se muestran los datos tendenciales de los cambios de uso de suelo de los años de 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010 con datos reales. También se muestra las tendencias de los cambios de uso de suelo para los años 2010, 2015 y 2020 simulados.

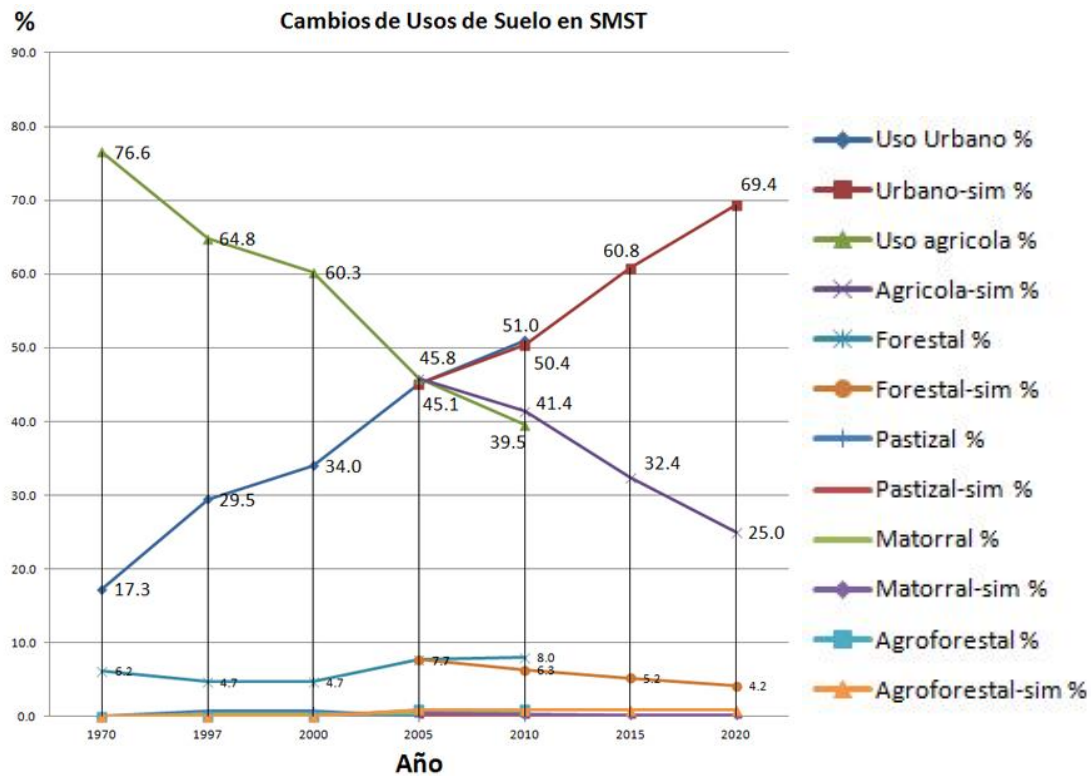
En la Gráfica 2 se puede apreciar las tendencias entre los datos reales y simulados y en donde se puede ver hay una gran similitud en las tendencias.

Tabla 3. Tendencias de cambios de uso de suelo para los años 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010 reales. 2010, 2015 y 2020 simulados

| Año | Uso Urbano % | Urbano Simulado % | Uso agrícola % | Agrícola simulado % | Forestal % | Forestal simulado % |
|------|--------------|-------------------|----------------|---------------------|------------|---------------------|
| 1970 | 17.3 | | 76.6 | | 6.2 | |
| 1997 | 29.5 | | 64.8 | | 4.7 | |
| 2000 | 34.0 | | 60.3 | | 4.7 | |
| 2005 | 45.1 | 45.1 | 45.8 | 45.8 | 7.7 | 7.7 |
| 2010 | 51.0 | 50.4 | 39.5 | 41.4 | 8.0 | 6.3 |
| 2015 | | 60.8 | | 32.4 | | 5.2 |
| 2020 | | 69.4 | | 25.0 | | 4.2 |

| Año | Pastizal % | Pastizal simulado % | Matorral % | Matorral simulado % | Agroforestal % | Agroforestal simulado % |
|------|------------|---------------------|------------|---------------------|----------------|-------------------------|
| 1970 | 0.0 | | 0.0 | | - | - |
| 1997 | 0.7 | | 0.3 | | - | - |
| 2000 | 0.7 | | 0.3 | | - | - |
| 2005 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.5 | 0.9 | 0.9 |
| 2010 | 0.0 | 0.0 | 0.5 | 0.3 | 0.9 | 0.9 |
| 2015 | | 0.0 | | 0.2 | | 0.9 |
| 2020 | | 0.0 | | 0.2 | | 0.9 |

El tercer método para validar el modelo y la simulación es comparar imágenes reales y simuladas con el uso del RMSE (“Root Mean Squared Error”). Al utilizar el RMSE en las imágenes del año de 2010 real y la imagen del año de 2010 simulada, se obtuvo un error del 0.0966637 (normalizado) y en porcentaje se tiene un 9.7 % de error entre las dos imágenes, es decir, se tiene un 90.3 % de similitud entre las imágenes.



Gráfica 2. Usos del suelo en el pueblo de Ajusco en 1970, 1997, 2000, 2005 y 2010 reales y 2010, 2015 y 2020 simulados

Fuente: Elaboración propia. Comparación de imágenes: uso del método RMSE

5. CONCLUSIONES

Se pudo estudiar y analizar el comportamiento de los cambios de uso de suelo, en el pueblo del Ajusco, considerándolos como un sistema urbano complejo, utilizando la teoría de los autómatas celulares.

Fue posible comprender mejor las relaciones que se tienen con las distintas variables, detectándose las siguientes:

1. El principal factor que determina el cambio de usos de suelo de rural a urbano es la red vial que facilita el acceso a estos terrenos.
2. Otro factor que influye en dicho cambio es la no aplicación de las normas existentes.
3. Se detectaron dos zonas con patrones de crecimiento urbano:
 - a) La zona central del pueblo que entre los años 2005 y 2010 tuvo un incremento del 153.7% en su área urbana.
 - b) La zona de la Venta, cuyo crecimiento es del doble que el del área central ya que del año 2005 al 2010 tuvo un incremento del 326.7%. Ver Tabla 4.

Tabla 4. Incremento del uso de suelo urbano, total y por zonas: Central y la Venta

| Uso Urbano | 2005 | 2010 Real | 2010 Simulado | Incremento entre 2005 y 2010 en % |
|------------|----------|-----------|---------------|-----------------------------------|
| Total | 324.4 ha | 540.2 ha | 533.7 ha | 164.5 % |
| Central | 304.2 ha | 474.6 ha | 467.6 ha | 153.7 % |
| Venta | 20.2 ha | 65.6 ha | 66.0 ha | 326.7 % |

4. Basados en los resultados de la simulación para el año 2010 y comparados con los datos reales para dicho año, se simularon los cambios esperados de los usos de suelo para los años de 2015 y 2020, que pueden ser usados como herramienta para la planeación urbana de la zona de estudio.

Sobre la situación actual y la problemática de la zona de estudio

En los últimos 50 años el pueblo de Ajusco fue perdiendo una parte de su territorio debido a diversas expropiaciones realizadas con el objeto de instalar servicios públicos o bien por las ventas ilegales de las parcelas comunales o ejidales y de las pequeñas propiedades.

Esta pérdida ha aumentado por la creación de vías de comunicación (avenidas y calles), ya sea de manera legal o ilegal, provocando la facilidad para el asentamiento de nuevos habitantes.

Por la dinámica que se detectó en los cambios de uso de suelo, el crecimiento urbano tiene un gran impacto en la zona agrícola, es decir, la zona donde crece principalmente lo urbano es sobre suelo agrícola.

El crecimiento urbano no se da por invasión, ésta se da por la venta de lotes de suelo ejidal principalmente. Esta venta se da principalmente por la necesidad de tener recursos los habitantes de la zona de estudio. Siendo éste el principal factor del cambio de los usos del suelo en zona. Este fenómeno ha sido tolerado por las autoridades, tanto ejidales, delegacionales y de la Ciudad de México

El cambio de uso de agrícola a urbano ha tenido un crecimiento importante en los últimos 15 años, ya que en el año de 1997 el suelo urbano tenía un 29.5% de la superficie y uso agrícola tenía un 64.8% y para el año 2010 el suelo urbano tenía un 51.0% de la superficie y el uso agrícola tenía un 39.5%, es decir lo urbano creció 20.5% y el suelo agrícola perdió 21.5%, es decir casi la misma cantidad que creció lo urbano, el suelo agrícola lo perdió. Esto se puede explicar porque la agricultura ha disminuido debido a que ya no es redituable para sus propietarios, dedicándose a otras actividades productivas.

La zona de bosques es otro uso de suelo que ha perdido superficie en consecuencia por el crecimiento urbano de la zona, pero en menor medida.

Otro aspecto que no se utilizó como variable en el modelado, pero que es importante mencionar, es que con el alto grado de crecimiento urbano traerá varios problemas, como:

- Falta de servicios básicos: agua, luz, drenaje.
- Falta de equipamiento: Mercados, escuelas, servicios médicos.
- Falta de transporte público, y el incremento del transporte privado.
- Problemas y carencias de vías de comunicación adecuadas, esto es, para llegar a la zona de SMSTA sólo se tiene un acceso, que es la carretera Picacho-Ajusco.

Sobre el modelo de White

Con respecto al modelo de White que fue el utilizado para simular los cambios de uso de suelo, se probó que genera datos (planos) que tiene un alto grado de semejanzas a la hora de compararlos con datos reales. En nuestro caso al comparar la imagen real para el año 2010 y la imagen simulada para ese mismo año, se tuvo un 90.3% de similitud entre ambas imágenes.

Esto da como conclusión que la simulación de los cambios de uso de suelo a corto plazo, 2015 (5 años) y mediano plazo, 2020 (10 años) se pueden tomar como base para hacer una planeación y calcular los servicios y equipamientos necesarios que se van a requerir en cada periodo. Además, también puede ayudar a ver qué zonas van a necesitar de nuevas vialidades, con sus correspondientes sistemas de transporte público, para disminuir la cantidad de tránsito vehicular.

También hay que considerar que con la simulación basada en AC se obtienen resultados a nivel espacial, con lo que es posible ubicar las zonas de crecimiento, con lo cual puede ayudar a las autoridades a tomar las medidas pertinentes si este crecimiento se da en zonas de alto riesgo o en zonas de alto valor ecológico.

La modelación de fenómenos sociales y/o urbanos, específicamente los referentes a los cambios de uso de suelo, pueden ser una herramienta importante para la toma de decisiones cuando se realicen los planes de desarrollo urbano.

Es posible también definir en el modelo una de las políticas existentes sobre los cambios de usos del suelo y ver los efectos en la simulación. En consecuencia, con el punto anterior, se pueden ver reflejados directamente a nivel espacial y temporal los efectos de las políticas. Con el ambiente computacional desarrollado es posible generar gráficas del comportamiento de los cambios de los usos del suelo, lo que da otra herramienta para el análisis de este fenómeno. Por último, se usaron tres técnicas para medir la calidad y semejanza de los resultados tanto a nivel estadístico como espacial.

REFERENCIAS

AGUILERA, A. (2002). *Ciudades como tableros de ajedrez. Introducción al modelado de dinámicas urbanas con autómatas celulares*. El Colegio de San Luis, México, San Luis Potosí.

WHITE, R. (1996). *The use of constrained cellular automata of high-resolution modelling of urban land-use dynamics*. *Environment and Planning B: Planning and Design* 24(3) 323 – 343, Memorial University of Newfoundland, St. John's, Canada.

SECCIÓN 9

INFRAESTRUCTURA DEL TRANSPORTE

TRANSPORT INFRASTRUCTURE

48 Simulation and optimization for urban transport infrastructure

Idalia Flores De La Mota

Esther Segura Pérez

Facultad de Ingeniería UNAM, México

ABSTRACT

The urban transport infrastructure is one of the most important problems for the cities, and involves many aspects that concern to citizens, governments and the economic growth of the countries. The objective of this paper is to show how this issue has been studied in recent years, with emphasis in the use of simulation and optimization at the whole planning process. We also consider important key topics as sustainability, costs and risks, mobility and environment impact. Some study cases are mentioned to clarify the concepts presented.

Key words: Urban transport, planning, simulation, optimization.

1. INTRODUCTION

Nowadays one of the bigger problems in cities is the transportation system and its infrastructure. There have been lots of studies and research in recent decades trying to find solutions. In general, there is an economic impact when countries make an investment in this sector. Most of the studies on transport infrastructure focus on its impact on growth. In the past two decades the analytical literature has grown enormously, with studies carried out using different approaches, such as production function (or cost) and growth regressions, as well as different variants of these models (using different data, methods and methodologies); the majority of these studies found that transportation infrastructure has a positive effect on productivity or growth rate (Calderón & Servén, 2008). One of the pioneers was Aschauer (1991) who, in his empirical study, provided substantial evidence that transport is an important determinant of economic performance. Another example is the study of Alminas et al., (2009), who found that the transport has contributed to the growth in the Baltic region. A study on the Spain's plan to extend roads and railways for connecting Spain to other countries concluded that these have a positive impact in terms of the Gross Domestic Product (GDP) (Álvarez-Herranz & Martínez-Ruiz, 2012). In a study of the railroad in the United States, it is mentioned that many economists believe that the project costs exceed the benefits (Balaker, 2006). However, the traditional cost-benefit assessment model does not include the impact of the development projects (De Rus, 2008). In these studies, focused on growth, we see there is a bias towards economic goals rather than social. That is why it is important to emphasize the impact of transport infrastructure on the development and not just on the growth. Some papers that deal with economic and social impacts are shown here.

In order to show the subject clearly, we will use a systems approach, dividing urban transport

infrastructure according to The City of Calgary (2009).

Urban Transport infrastructure:

- Transportation Planning
- Transportation Optimization
- Transportation Simulation

According to this system paradigm, this paper is focused on the description of the research made in the last five years, mainly considering optimization, simulation and intelligent systems. The structure of this paper is as follows. Section 2 shows the state of the art for the general transportation planning issue. Section 3 is devoted to transportation optimization. Section 4 shows some simulation tools that have been used in different ways in accordance with the problems they are meant to solve. Section 5 is devoted to some cases in different cities around the world. Short conclusions are given at the end of the paper.

2. TRANSPORTATION PLANNING

Transportation planning covers a lot of different aspects and it is an essential part of the system. According to Levy (2011), “Most regional transport planners employ what is called the rational model of planning. The model considers planning as a logical and technical process that uses the analysis of quantitative data to decide how to best invest resources in new and existing transport infrastructure.” Figure 1 show the phases in Transportation Planning.

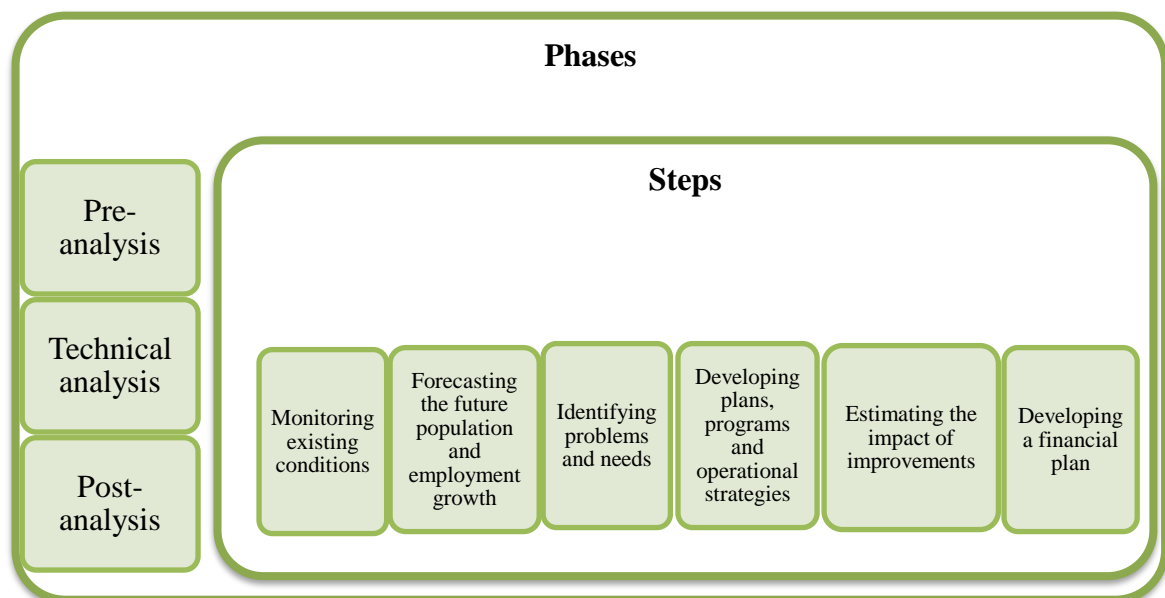


Figure 1. Transportation planning phases

2.1 Phases for transportation planning

There are three phases: The first, pre-analysis, considers what problems and issues the region faces and what goals and objectives it can set to help address those issues. The second phase is technical analysis. The process basically involves the development of the models to be used later. The post-analysis phase involves plan evaluation, program, implementation and monitoring of the results (Johnston, 2004).

Transportation planning involves the following steps:

- Monitoring existing conditions;
- Forecasting future population and employment growth, including assessing projected land uses in the region and identifying major growth corridors.
- Identifying current and projected future transportation problems and needs and analyzing, through detailed planning studies, various transportation improvement strategies to address those needs.
- Developing long-range plans and short-range programs of alternative capital improvement and operational strategies for moving people and goods.
- Estimating the impact of recommended future improvements to the transportation system on environmental issues, including air quality; and
- Developing a financial plan for securing sufficient revenues to cover the costs of the implementing strategies.

In order to consider these aspects, it is important to study them into an urban infrastructure scope.

2.2 Urban Infrastructure

Urban infrastructure, a human creation, is designed and directed by architects, civil engineers, urban planners among others. These professionals design, develop and implement projects (involved with the structural organization of cities and companies) for the proper operation of important sectors of the society. When governments are responsible for construction, maintenance, operation and costs, the term “urban infrastructure” is a synonym for public works.

Road infrastructure is the set of facilities and equipment used for roads, including road networks, parking spaces, traffic lights, stop signs laybys, drainage systems, bridges and sidewalks. Urban infrastructure includes transportation infrastructure, which can, in turn, be divided into three categories: land, sea, and air. In Figure 2 we show a scheme for urban infrastructure issue.

Some papers published concerning transport planning are as follows:

One of the tools is the Visual TPL (Public Transport in Italy) tool has been designed to be used by experts in planning and evaluation of transport systems with the purpose of identifying the critical points which could be studied to rationalize them and reduce the

burden on the public purse. This tool along with maps and other features helps the planners.

Litman (2012) summarizes basic principles for transportation planning. It describes conventional transport planning, which tends to focus on motor vehicle traffic conditions, and newer methods for more multi-modal planning and evaluation.

The study developed by JICA (The Japan International Cooperation Agency) is the result of a huge experience in more than 60 countries, and its purpose is to contribute to the formulation of medium-to long-term development strategies for urban transport. A schema is shown in Figure 3.

Based on the transportation planning issues, tools as optimization and simulation have been widely used to solve them, as shown in next sections.

Nowadays it is very important that Urban Infrastructure Planning considers the sustainability aspect, in this direction many papers have been published.

Urban planning is a key core for the sustainable study, many authors have analyzed this issue and proposed alternatives to deal with urban transportation in cities. One of the main concerns is the CO2 reduction.

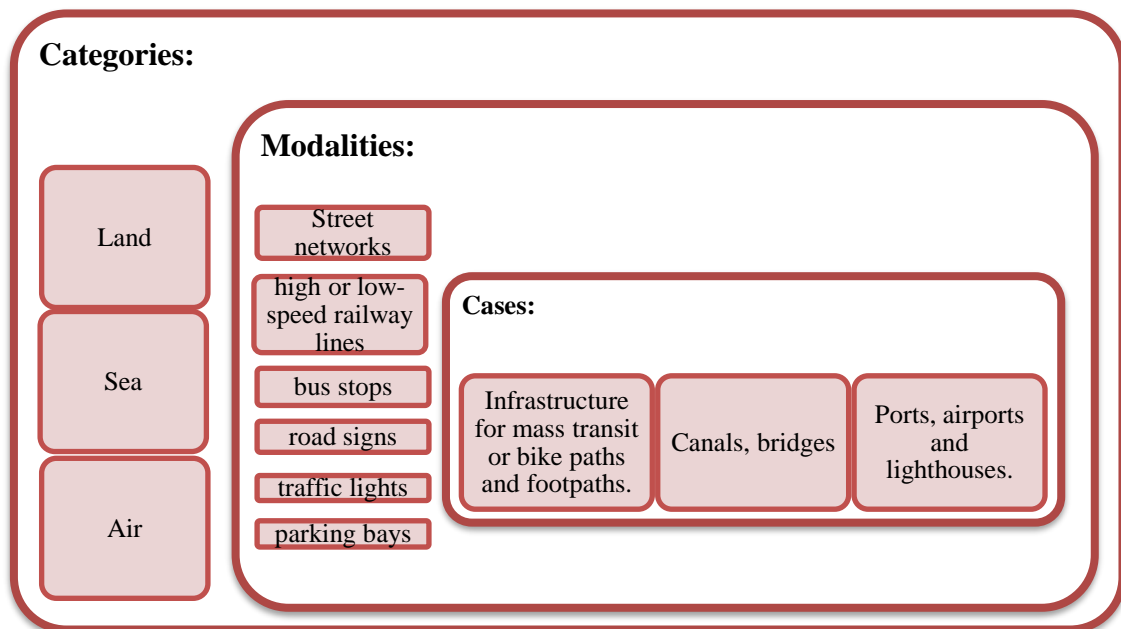


Figure 2. Urban Infrastructure: categories and modalities

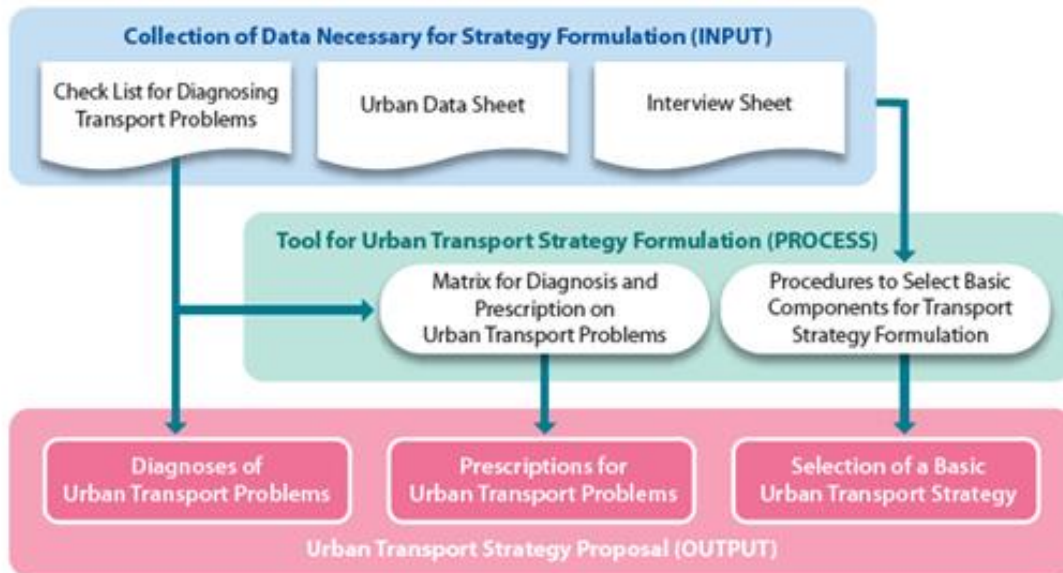


Figure 3. Guidelines for formulating an urban transport strategy

Source: JICA, 2015

France has been a pioneer in sustainable urban mobility plans as it is exposed in the report “30 years of sustainable urban mobility plans (PDU) in France (April 2013)”. Shanghai also published a Manual in 2011, to emphasize the importance of considering the urban ecological environment such as to integrate environmental issues into urban planning and administration, and accelerate the transition to sustainable development.

May (2014) published about The European Commission’s 2009 Action Plan for Urban Transport identified, and its first Action, the provision of guidance on Sustainable Urban Mobility Plans. He reviewed this experience and identified areas in which further research is needed. The paper reviewed the background for the preparation of a guidance at a European level and at a national level for Belgium, France, Germany, Italy, Poland, Scandinavia, Spain and the UK. It identifies the weaknesses in the preparation of the Sustainable Urban Mobility Plans, highlighted by those who prepared the guidance and by the researchers.

Medina et al., (2012) pointed out that the planning of urban mobility is an effective public policy tool for the elimination of social inequalities and achieving the sustainability of cities. Until now, its potential has not been exploited in Mexico. On the contrary, the planning of urban mobility has traditionally been thought of as a function of the automobile and has generated severe environmental and equity problems. Urban mobility planning should focus on two fundamental issues: how to think about urban mobility in terms of equity and sustainability, and how to implement these solutions for the population to take ownership of them.

Urban peripheries are studied by Geneletti et al., (2017). In this paper authors reviewed 102 papers related to sustainable planning in urban peripheries by applying a framework built on two main research questions that address: i) the type of peripheries and sustainable planning approaches considered; ii) the challenges and recommendations reported. Authors remark the underexploited opportunities offered by urban peripheries, especially regarding ecological planning approaches.

3. TRANSPORTATION OPTIMIZATION

The goal of transportation optimization is to identify, evaluate and plan enhancements that optimize the operation of a transportation system. Keeping this in mind, many countries have specific policies and a lot of research has been developed over recent years for this purpose. Optimization deals mainly with networks operation, traffic, costs, maintenance, sustainability, mobility and management infrastructure. These aspects require balance between the performance of the structure and the total cost accrued over the entire life-cycle. This idea is reflected in Figure 4.

There is a website that considers some principles for transportation optimization (<http://www.jda.com/>). The Transportation Management System Investment must optimize beyond the carrier selection and the rates, to address myriad constraints and granular functions that apply three key principles:

1. One size does not fit all
2. The details matter
3. Concurrency is king.

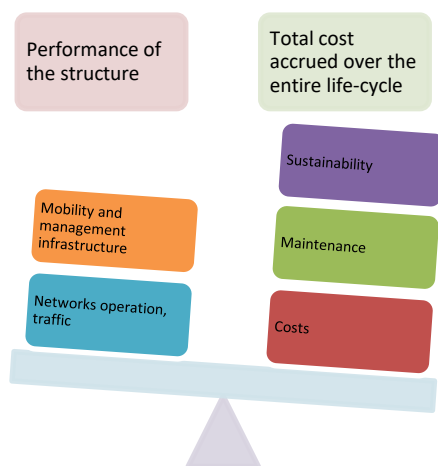


Figure 4. Balance between performance and total cost in entire life-cycle

Multicriteria decision making techniques are used for the sustainability evaluation of urban mobility projects, considering an integration of the triple bottom line concept i.e., the achievement of social, economic and environmental objectives with technical efficiency; the sustainability evaluation of urban mobility projects under qualitative data are also studied.

For networks, some routing studies have been developed using either genetic algorithms hybridized with Dijkstra algorithms to find the shortest routes, or just some advanced label algorithms as the one shown in Klunder (2006).

As has already been mentioned, metaheuristics are used because they provide very good solutions in a short time, as the neural networks used by Yu et al (2011). However other authors use exact methods as branch and bound, branch and cut, or dynamic programming. The location and routing problem presented by Belenguer et al., (2011) uses branch and cut for the design of a logistic networks. In this case the overall distribution cost may be excessive if routing decisions are ignored when depots are located. In order to overcome this problem, they propose a branch and cut algorithm. The proposed method is based on a zero-one linear model reinforced by valid inequalities.

Berman et al., (2011) gave an example of searching paths for service. Considering multi-objective optimization, Wanga et al., (2014) proposed a bilevel multi-objective approach to optimize tolls in a road network. Another paper related to multi-objective is Guerriero et al., (2014). “In the Dial-a-Ride public transportation systems, each customer requirement is specified in terms of a pickup (origin), a delivery (destination) and a time window. The aim is to find a set of routes, each one assigned to a vehicle, to satisfy the set of requirements, under capacity, time windows, precedence and pairing constraints.

Fancello et al., (2014) developed an integrated performance indicator of an urban road infrastructure for evaluating the network functionality and the impact of the transport system interventions.

An interesting application of optimization is presented by Spiliopoulou et al., (2014), they validated a macroscopic traffic flow model.

Travel time on a network is different for public and for private transport, for this reason Salonen & Toivonen (2013) assumed that the inequality of the accessibility for different transportation modes let to assess the environmental and social sustainability of transportation and land use..

4. TRANSPORTATION SIMULATION

As shown in the previous section, optimization is a good tool for studying the system operation; it is helpful for minimizing costs or time, selecting routes and solving decision problems related to budget, to mention some problems. Data of transportation is not always

deterministic but stochastic, for the latter case simulation is an analysis tool that helps to answer what if? questions. Let to construct scenarios and choose the one that best fits our needs (Table 1).

Some papers on simulation are presented here below:

Lovelace et al., (2014) studied the statistics on travel mode and distance, which depends on a range of factors at different scales. They proposed “a spatial micro-simulation approach, which combines an individual-level survey data with geographically aggregated census results to tackle the problem.”

Solecka and Žak (2014) presented a methodology for designing and assessing transportation solutions, for the integration of an urban public transportation system. Their approach is based on the application of a heuristic –expert design of an integrated urban public transportation system, based on a multidimensional macro-simulation– and a multiple parameter comparison with the existing solution. The paper describes the steps for applying the proposed procedure that leads to the development of an integrated public transportation system. Lianga et al., (2013) developed the SAT. This project is a three-dimensional dynamic transport system, which is the first step towards breaking the two-dimensional use of modern cities. It is designed for passengers and goods transportation (around 15-20 passengers per unit). It consists of unitary electric vehicles, which work under different directions of movement: horizontal, vertical and in a gradient. Its tracks are modular structures in the form of suspended tubes that require minimal supports. The vehicles will work under several directions of movement (suspended, laid on tracks and supported laterally). Consequently, it will act as a catalytic tool for the redefinition of urban space, generating mutations in the architectural morphology and typology. It is a private-public transport system, due to the possibility of interacting under different urban scales, from a small and private one to a large and public one. The SAT project will provide a sustainable solution to the new demand and requirement for urban transport in the future. Also, they discussed a first attempt to develop a library of simulation building blocks to evaluate the performance of the SAT.

Table 1. Types of Simulation in Transportation

| Time | State | Space | | |
|------------|--------------------------|--|---|---|
| | | Continuous | Discrete | N/A |
| Continuous | Discrete | Real Transportation Systems, Traffic flow, pedestrians, Dynamic traffic assignment | | Discrete Event Systems, queueing, inventory, manufacturing |
| | Continuous | Traffic Models | | Vehicle motion Car suspension Queueing (fluid aprox) |
| Discrete | Discrete | | Cellular automata Traffic, pedestrians, Land use, urban sprawl Random number generation | Discrete Urban Simulation queueing, inventory, manufacturing |
| | Continuous | Car following models Microscopic traffic flow models | Numerical methods Godunov, variational | Numerical methods Euler Runge-Kutta, time series ARIMA |
| N/A | Discrete o Continuous | Monte Carlo Method: use pseudo-random number Simulation of static probabilistic problems Integration, Optimization | | Econometric models Trip generation, modal split Optimization Static traffic assignment |

Source: Behrisch et al., 2011

Batura & Koc (2017) presented a study based on a critical review of the literature to establish a policy framework for social behavior change, particularly developed and tested for urban mobility and traffic congestion. First, several megacities were compared with different sustainability indicators. Then, selected potential policies were evaluated, such as Travel Demand Management (TDM). For Istanbul, surveys were conducted with the objective of revealing the residents' travel patterns, their perceptions and attitudes about the current performance of the transportation system and their opinions on possible TDM interventions in the future. They proposed a multiplicative model to process data from these surveys as inputs, which would then be used to determine travel demand. A simulation model was built and validated with the current traffic congestion metrics obtained from field measurements in a selected district of Istanbul. Based on this validated simulation model, projections of traffic conditions in the future were predicted under different TDM scenarios, based on potentials PDM obtained from the survey. It was obtained that the congestion levels in Istanbul tend to worsen year after year under existing conditions, but it was also found that TDM policies offer significant potential to reduce congestion, and therefore their risks consequently, through greater use of sustainable mobility modes without the need for new investments in infrastructure.

Simulation of Urban Mobility, SUMO, (Behrisch et al., 2011) is an open source traffic simulation package including demand modeling components. Authors describe the current state of the software as well as its future developments and extensions. SUMO could help in the research of several topics, it is used to simulate automatic driving or traffic management strategies.

5. CONCLUSIONS

There is an important contribution of the simulation and optimization techniques to solve transportation problems, from micro applications to large systems, considering not just urban transport and not only by land. In this paper we just described a part of this application area. More research is needed for big cities as Mexico City, and to be able to implement policies that allow a long term planning.

REFERENCES

- ALMINAS, M. VASILIAUSKAS, A. V. JAKUBAUSKAS, G. (2009). *The Impact of transport on the competitiveness of national economy*. Department of Transport Management 24(2), pp. 93-99.
- ÁLVAREZ-HERRANZ, A. MARTÍNEZ-RUIZ, M.P. (2012). *Evaluating the economic and regional impact on national transport and infrastructure policies with accessibility variables*. Transport 27 (4), pp. 414-427.
- ASCHAUER D.A. (1991). *Transportation spending and economic growth: the effects of transit and highway expenditures*. Report Washington, D.C: American Transit Association.

- BALAKER, T. (2006). *Do economists reach a conclusion on rail transit?* Econ Journal Watch, 3(3), pp. 551.
- BATURA, I., KOÇ, M. (2017). *Travel Demand Management (TDM) case study for social behavioral change towards sustainable urban transportation in Istanbul.* Cities 69, pp. 20–35.
- BEHRISCH, M., BIEKER, L., ERDMANN, J., KRAJZEWICZ, D. (2011). *Simulation of Urban Mobility. An Overview.* SIMUL 2011: The Third International Conference on Advances in System Simulation.
- BELENGUER, J.M, BENAVENT, E., PRINS, C., PRODHON, C., WOLFLER CALVO, R. (2011). *A Branch-and-Cut method for the Capacitated Location-Routing Problem.* Computers & Operations Research 38, pp. 931–941.
- BERMAN, O., IANOVSKY, E., KRASS, D. (2011). *Optimal search path for service in the presence of disruptions.* Computers & Operations Research 38, pp. 1562–1571.
- CALDERÓN, C. SERVÉN, L. (2008). *Infrastructure and economic development in Sub-Saharan Africa.* The World Bank Policy Research Working Paper, 4712.
- DE RUS, G. (2008). *The Economic effects of high speed rail investment.* University of Las Palmas, Spain, Discussion Paper, 2008-16.
- FANCELLO G., CARTA M., FADDA P. (2014). *A modeling tool for measuring the performance of urban road networks.* Procedia - Social and Behavioral Sciences 111, pp 559 – 566.
- GENELETTI, D., DE LA ROSA, D., SPYRA, M., CORTINOVIS, CH. (2017). *A review of approaches and challenges for sustainable planning in urban peripheries.* Landscape and Urban Planning 165, pp. 231–243.
- GUERRIERO, F., PEZZELLA, F., PISACANE, O., TROLLINI, L. (2014). *Multi-objective optimization in dial-a-ride public transportation.* Transportation Research Procedia 3, pp 299 – 308.
- JDA (2015). *Three Principles of Transportation Optimization.* www.jda.com [accessed October 15 2015]
- JICA. (2015). *The Research on Practical Approach for Urban Transport Planning.* <http://www.jica.go.jp/spanish/> [accessed 12 November 2015].
- JOHNSTON, R. A. (2004). *The Urban Transportation Planning Process.* In: S. Hansen, & G. Guliano (Eds.), *The Geography of Urban Transportation.* The Guilford Press. Multi-Modal Transportation Planning. pp. 115-138.
- KLUNDER, G.A. Post, H.N. (2006). *The Shortest Path Problem on Large-Scale Real-Road Networks.* Networks, pp. 182-194.
- LEVY, J. M. (2011). *Contemporary Urban Planning.* Boston: Longman.
- LIANGA Y., SERRANO, J., PECORARI, N.A., SERRANO, V. (2013). *Simulation study towards a new sustainable transportation solution in urban areas.* S.A.T. Project. Procedia - Social and Behavioral Sciences 96, pp. 1712 – 1720.
- LITMAN, T. (2012). *Introduction to Multi-Modal Transportation Planning Principles and Practices.* Victoria Transport Policy Institute, 2012.

- LOVELACE, R., BALLAS, D., WATSON, M. (2014). *A spatial microsimulation approach for the analysis of commuter patterns: from individual to regional levels*. Journal of Transport Geography 34, pp. 282–296.
- MAY, A.D. (2014). *Encouraging good practice in the development of Sustainable Urban Mobility Plans (In Press)*. Institute for Transport Studies, University of Leeds, LS2 9JT England, United Kingdom.
- MEDINA R.S., VELOZ R.J., IRACHETA C.A., IRACHETA C.J. (2012). *Planes Integrales de Movilidad Lineamientos para una movilidad urbana sustentable*.
- SALONEN, M., TOIVONEN, T. (2013). *Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport*. Journal of Transport Geography 31, pp. 143–153.
- SOLECKA, K., ŽAK, J. (2014). *Integration of the urban public transportation system with the application of traffic simulation*. Transportation Research Procedia 3, pp. 259 – 268.
- SPILIOPOULOU, A., KONTORINAKI, M., PAPAGEORGIOU, M., KOPELIAS, P. (2014). *Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas*. Transportation Research Part C 41, pp. 8–29.
- THE CITY OF CALGARY, TRANSPORTATION DEPARTMENT (2009). Available from <http://www.calgary.ca/Transportation/Pages/Transportation-Department.aspx>. [accessed 8 March 2014].
- WANGA, J.Y., EHRGOTT, M., DIRKS, K., GUPTA A. (2014). *A bilevel multi-objective road pricing model for economic, environmental and health sustainability*. Transportation Research Procedia 3, pp. 393 – 402.
- YU, B, LAM W, LAM TAM, M. (2011). *Bus arrival time prediction at bus stop with multiple routes*. Transportation Research Part C 19-6, pp. 1157-1170.

49 Análisis de rentabilidad de la concesión de autopistas en operación en México

Luis Antonio Rocha Chiu

Universidad Autónoma Metropolitana, México

Antonio Sánchez Soliño

Manuel Rivas Cervera

Universidad Politécnica de Madrid, España

RESUMEN

Entre 1989 y 1994 se realizó el programa de autopistas de peaje más grande de su clase en el mundo (4,657 km) mediante concesión al sector privado, pero debido a diversos errores de instrumentación del Programa de Autopistas 1989-94 dos tercios de la red concesionada tuvieron que ser rescatada financieramente en 1997 por el gobierno mexicano. Los resultados adversos del Programa de Autopistas 1989-94 obligaron a las autoridades mexicanas a diseñar otros mecanismos de participación del sector privado en el desarrollo de infraestructura carretera, entre ellos el modelo de aprovechamiento de activos.

El modelo de aprovechamiento de activos es un esquema para concesionar autopistas en operación que son propiedad del gobierno mexicano, la mayor parte de los proyectos que hasta la fecha han sido concesionados fueron rescatados en 1997. Este esquema implica la concesión por un plazo de tiempo fijo de un grupo de autopistas de peaje en operación y proyectos por construir o modernizar, a cambio de un pago. Entre 2007 y 2012 mediante este modelo se otorgaron 4 paquetes en concesión por un total de 1,603 km de autopistas, por las que el gobierno mexicano recibió un pago neto de 4,681 millones de dólares.

En este trabajo se determina la rentabilidad financiera de cada paquete de activos (valor presente neto y tasa interna de retorno), considerando el pago inicial, los costos de operación y mantenimiento y las inversiones en obras efectuadas por el concesionario.

Palabras clave: Autopistas de peaje, modelo de concesiones BOT y rentabilidad financiera.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la red de autopistas de México inició en 1950. Durante 40 años se construyeron con recursos públicos mil kilómetros de autopistas de peaje administradas por el gobierno y 3 mil kilómetros de autopistas de libre circulación. A finales de la década de 1980, la insuficiencia de presupuesto público, la conveniencia de reactivar la economía por

medio del sector de la construcción y la necesidad de contar con infraestructura carretera de alta calidad, llevaron a las autoridades mexicanas a considerar otras alternativas de financiamiento; debido a esta situación se formuló el Programa de Autopistas 1989-94 en colaboración con el sector privado, empleando el modelo de concesión: construir, operar y transferir (Building, operate and transfer-BOT).

En la ejecución del Programa de Autopistas 1989-94 la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) asumió las responsabilidades siguientes: planificó la red y seleccionó los proyectos; proporcionó el proyecto ejecutivo, el costo estimado y las proyecciones de tráfico; especificó los rangos de peaje permitidos; y, entregó el derecho de vía. Las concesiones se otorgaron a través de un concurso público, a la oferta con el menor plazo de concesión, y caminos paralelos libres de peaje debían estar disponibles en las rutas concesionadas (SCT, 1995). Al final de 1994 se habían otorgado 52 concesiones por 5,348 km, como se presenta en la Tabla 1.

A pesar de estos logros el Programa de Autopistas 1989-94 fue altamente controvertido, ya que aun antes de la crisis del peso en diciembre de 1994 algunas concesiones presentaban deficientes resultados financieros, debido a mayores costos de construcción, al menor tráfico de vehículos por deficientes proyecciones de la SCT y a los altos peajes inducidos por la asignación de los proyectos al menor plazo de concesión (Gómez-Ibáñez, 1997). El gobierno instrumentó en los siguientes años diferentes medidas de apoyo económico a los concesionarios, las cuales no fueron suficientes para compensar los problemas en muchos proyectos, por lo que el gobierno federal se vio en la necesidad en agosto de 1997 de rescatar financieramente 23 concesiones con una longitud total de 3,143 km, asumiendo los pasivos de los proyectos estimados en 7,400 millones de dólares, de los cuales 4,700 millones de dólares eran deuda con los bancos mexicanos y 2,700 millones de dólares constituían la deuda con las compañías constructoras. Para los concesionarios, significó cancelar su derecho a explotar la infraestructura y la pérdida del capital invertido (3,000 millones de dólares) a cambio de la cancelación de la deuda bancaria (Ruster, 1997).

El gobierno estimó que el rescate sería financiable a largo plazo si los ingresos de las autopistas rescatadas crecían al menos un 3% por año; para alcanzar esta meta la SCT anunció la disminución de los peajes de las autopistas rescatadas y posteriormente inició la reestructuración de la deuda bancaria con créditos a plazos más largos que los originales y menores tasa de interés.

Tabla 1. Concesiones del Programa de Autopistas de Peaje 1989-94

| Concesiones | | Longitud (Km) | | |
|--------------------------|-----------|---------------|-----------------|--------------|
| Concesionario | Número | En operación | En construcción | Suma |
| Sector privado | 30 | 3,263 | 222 | 3,485 |
| BANOBRAS | 3 | 237 | 0 | 237 |
| Gobiernos de los Estados | 19 | 1,157 | 469 | 1,626 |
| Totales | 52 | 4,657 | 691 | 5,348 |

Fuente: SCT, 1995

Aunque México fue pionero entre los países en desarrollo en usar el financiamiento privado para construir carreteras de peaje, el Programa de Autopistas 1989–1994 es más famoso por su tamaño y por el fracaso financiero de los proyectos concesionados. No obstante, algunos años después del rescate, la percepción del fracaso mexicano ha cambiado sustancialmente. Por ejemplo, el Banco Mundial (World Bank, 2003) destaca el aumento del tráfico (75%) y de los ingresos (41%) en las autopistas de peaje rescatadas en los tres años siguientes al rescate financiero y en un estudio reciente (Carpintero y Gómez-Ibáñez, 2011) se muestra que los costos del rescate serán pagados con los ingresos de las concesiones rescatadas, debido al aumento del tránsito del 7.3% en promedio anual entre 1995 y 2009.

De este modo, los resultados del Programa de Autopistas 1989-94 obligaron al gobierno a modificar la legislación de caminos y a diseñar los nuevos esquemas de colaboración del gobierno con el sector privado: nuevo modelo de concesiones para construir autopistas de peaje, modelo de proyectos de prestación de servicios para modernizar carreteras existentes y modelo de aprovechamiento de activos para concesionar autopistas de peaje en operación.

En este trabajo se realiza un estudio del comportamiento del tránsito de las autopistas en forma individual y por paquete de activos para determinar los ingresos anuales desde el inicio de la concesión al año 2015, con esta información se pronostican los ingresos durante el plazo de concesión y se determina la rentabilidad financiera de cada paquete de activos (valor presente neto y tasa interna de retorno) considerando el pago inicial, los costos de operación y mantenimiento y las inversiones en obras efectuadas por el concesionario.

2. ESTUDIO DE LA RENTABILIDAD DE LA CONCESIÓN DE AUTOPISTAS DE PEAJE EN OPERACIÓN

Modelo de aprovechamiento de activos.

A principios de este siglo la SCT analizó la posibilidad de obtener recursos financieros a través de la concesión de las autopistas en operación que habían sido rescatadas por el gobierno mexicano en 1997. Los especialistas de la SCT elaboraron diversos estudios para formular el mecanismo de concesión más atractivo para los inversionistas, concluyeron que una combinación de autopistas de peaje en operación y carreteras que requerían modernizar sus características físicas integradas regionalmente podrían ofrecer buenos resultados, por lo que se formaron grupos de autopistas y carreteras que se identificaron con la zona geográfica en que estaban localizadas, el esquema resultante se denominó *modelo de aprovechamiento de activos*.

Las características generales del modelo de aprovechamiento de activos son semejantes al modelo de concesiones BOT, con la diferencia de que se le asocian autopistas de peaje en operación y proyectos por construir o modernizar. Los proyectos se asignan mediante licitación pública bajo el control de la SCT, quien entrega a los concursantes la información detallada de los proyectos en operación y el proyecto ejecutivo, los permisos, el estudio de

demanda y el derecho de vía liberado de las obras por construir o modernizar; también, fija las tarifas máximas y las normas para su actualización. La concesión se otorga por 30 años al licitante que cumple con los requisitos legales, técnicos y financieros de la licitación y ofrece el mayor pago inicial (SCT, 2011). Al recibir el título de concesión, el concesionario adquiere la obligación de modernizar, operar, explotar y mantener las autopistas en operación, así como financiar, construir, operar, explotar y mantener los nuevos proyectos (Figura 1).

Entre todas las licitaciones realizadas por SCT para este modelo, sobresale la primera colocación en 2007 del paquete Centro Occidente, por el cual el gobierno federal obtuvo un pago de 4,053.1 millones de dólares, importe dos veces mayor al valor técnico de referencia estimado por la SCT antes de la licitación (Espelt, 2011). No obstante, debido a la crisis financiera internacional de 2008-2009 las autoridades de la SCT tuvieron que redimensionar los paquetes de licitación ante la falta de postores atractivos en las convocatorias internacionales de los paquetes del Pacífico, Noreste y Noreste I, las cuales fueron declaradas desiertas. El paquete del Pacífico se desagregó en varios proyectos, formando dos paquetes: el paquete Pacífico Norte, licitado en 253.7 millones de dólares; el paquete Pacífico Sur, asignado en 315.9 millones de dólares; y, el resto de los proyectos se reasignaron al nuevo modelo de concesiones y a contratos de obra pública. El paquete Michoacán fue adjudicado en marzo de 2012 en 58.7 millones de dólares (Tabla 2).

A pesar de la diferencia tan grande entre los pagos de cada uno de los grupos de autopistas, la SCT no contempla proporcionar información sobre el valor técnico de referencia de los paquetes sujetos a concesión porque considera que se limitarían los montos que los licitantes están dispuestos a ofrecer (De Buen, 2011).

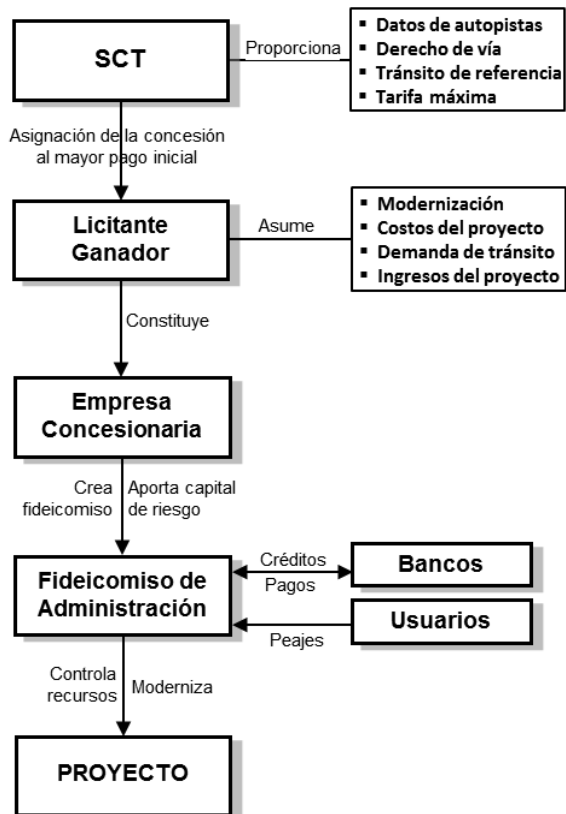


Figura 1. Estructura del modelo de aprovechamiento de activos

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Resultados del modelo de aprovechamiento de activos

| No | Proyectos | Longitud (km) | Pago (mdd) | Costo (mdd) |
|---------------------------------|---------------------------------------|--|----------------|----------------|
| Paquete Centro Occidente | | Fecha de asignación 3 de octubre de 2007 | | |
| 4 | Autopistas de peaje en operación | 558.0 | 4,053.1 | |
| 5 | Obras de construcción o modernización | 76.3 | | 131.1 |
| | Total | 634.3 | 4,053.1 | 131.1 |
| Paquete Pacífico Norte | | Fecha de asignación 30 de noviembre de 2009 | | |
| 1 | Autopista de peaje en operación | 181.5 | 253.7 | |
| 2 | Obras de construcción | 60.0 | | 195.8 |
| | Total | 241.5 | 253.7 | 195.8 |
| Paquete Pacífico Sur | | Fecha de asignación 30 de noviembre de 2011 | | |
| 1 | Autopista de peaje en operación | 168.6 | 315.9 | |
| 2 | Obras de construcción | 141.0 | | 485.7 |
| | Total | 309.6 | 315.9 | 485.7 |
| Paquete Michoacán | | Fecha de asignación 30 de marzo de 2012 | | |
| 3 | Autopista de peaje en operación | 272.2 | 58.7 | |
| 3 | Obras de construcción o ampliación | 145.3 | | 478.8 |
| | Total | 417.5 | 58.7 | 478.8 |
| 21 | Totales | 1,602.9 | 4,681.4 | 1,291.4 |

Fuente: SCT, 2011 y ASF, 2014

Paquete Centro Occidente. El paquete Centro Occidente se integró con las autopistas de peaje en operación: Maravatío-Zapotlanejo, Guadalajara-Zapotlanejo, Zapotlanejo-Lagos de Moreno y León-Aguascalientes, que suman una longitud total de 558.0 km. Además, se incluyó: la construcción de las autopistas El Desperdicio-Encarnación de Díaz y Zacapu-Entronque Maravatío-Zapotlanejo; la ampliación a seis carriles de un tramo de la autopista Guadalajara-Zapotlanejo; y la reconstrucción del pavimento de las autopistas El Desperdicio-Lagos de Moreno y León-Aguascalientes (Tabla 3).

La licitación se realizó entre noviembre de 2006 y julio de 2007, la convocatoria captó el interés de un número importante de empresas nacionales y extranjeras, entre compañías constructoras, grupos financieros y desarrolladoras de infraestructura. Al final se presentaron propuestas de seis consorcios y la concesión fue otorgada a la oferta más alta de 4,053.1 millones de dólares presentada por el consorcio formado por Constructora ICA y Goldman Sachs, y destaca que la diferencia de pagos entre las primeras cuatro propuestas fue inferior al 5%.

Los trabajos de rehabilitación de las autopistas de peaje en operación se realizaron entre 2008 y 2010 y las obras de ampliación del paquete se ejecutaron durante seis años, a finales de 2014 el concesionario había completado el 88.6% de las obras, con excepción de la autopista Zacapu-Entronque Maravatío-Zapotlanejo que no ha podido ejecutarse por falta de liberación del derecho de vía (RCO, 2015). El costo total de las obras en el período 2008-2014 ascendió a 395.8 millones de dólares, de los cuales, el 66.9% se destinó a trabajos de rehabilitación y mantenimiento y el resto a las obras de construcción, ampliación, reconstrucción del pavimento y liberación del derecho de vía (Tabla 4).

Las autopistas del Paquete Centro Occidente han tenido un aumento anual del tránsito promedio ponderado de 2.7% en el período 2007-2015, en el que las vías han estado administradas por el concesionario (Tabla 5).

Destaca el bajo crecimiento del tránsito de la autopista Guadalajara-Zapotlanejo ocasionado por las obras de ampliación realizadas en el período 2010-2014 y la transferencia de tránsito a la carretera libre de peaje que une las dos poblaciones, la cual terminó su ampliación a 4 carriles en 2010. Así, la vía libre tuvo un aumento notable de tránsito, ya que en 2007 conducía solamente 14,249 vehículos diarios, en 2010 captó un tránsito diario de 17,804 vehículos y en 2014 recibió un tránsito diario de 42,032 vehículos (SCT, 2015).

El análisis del desempeño individual indica que el crecimiento anual de los ingresos entre 2007 y 2015 para la autopista Guadalajara-Zapotlanejo fue de 1.9% en promedio, en la Maravatío-Zapotlanejo de 4.9%, en la Zapotlanejo-Lagos de Moreno de 5.8% y en la León-Aguascalientes de 7.3%, porcentajes de aumento mayores que los promedios de tráfico registrado (Tabla 6).

Tabla 3. Características del Paquete Centro Occidente

| No. | Autopistas de peaje en operación | Carriles | Longitud (km) | Inicio operación |
|-----|---|--------------|---------------|------------------|
| 1 | Maravatío-Zapotlanejo | 4 | 309.7 | Oct-1993 |
| 2 | Guadalajara-Zapotlanejo | 4 | 26.0 | Ago-1994 |
| 3 | Zapotlanejo-Lagos de Moreno | 4 | 118.5 | May-1991 |
| 4 | León-Aguascalientes | 4 | 103.8 | Sep-1992 |
| | | Total | 558.0 | |
| No. | Obras | Carriles | Longitud (km) | |
| 1 | El Desperdicio-Encarnación de Díaz (Construcción) | 2 | 19.0 | Ago-2014 |
| 2 | Zacapu-Entronque Maravatío-Zapotlanejo (Construcción) | 2 | 8.7 | Pendiente |
| 3 | Guadalajara-Zapotlanejo (Ampliación) | 6 | 16.5 | Ene-2014 |
| 4 | El Desperdicio-Lagos de Moreno (Reconstrucción) | 4 | 27.8 | Ene-2010 |
| 5 | León-Aguascalientes (Reconstrucción) | 4 | 4.3 | Dic-2009 |
| | | Total | 76.3 | |

Fuente: SCT, 2011 y RCO, 2015

Tabla 4. Inversión en obras del Paquete Centro Occidente (mddUS de 2007)

| Inversión | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | Total |
|----------------------------|-------------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| Obras de ampliación | 4.0 | 32.5 | 18.6 | 9.6 | 25.0 | 20.7 | 20.7 | 131.1 |
| • Construcción | 4.0 | 30.4 | 17.7 | 9.2 | 24.8 | 20.6 | 20.3 | 127.0 |
| • Derecho de Vía | 0.0 | 2.1 | 0.9 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 0.4 | 4.1 |
| Trabajos de rehabilitación | 33.3 | 75.3 | 67.0 | 24.6 | 23.5 | 22.7 | 18.3 | 264.7 |
| Total por año | 37.3 | 107.8 | 85.6 | 34.2 | 48.5 | 43.4 | 39.0 | 395.8 |

Fuente: RCO, 2015

Tabla 5. Tránsito diario en las autopistas del Paquete Centro Occidente

| Autopista | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|
| Guadalajara-Zapotlanejo | 33,617 | 34,169 | 33,273 | 31,714 | 30,791 | 30,482 |
| Maravatío-Zapotlanejo | 6,597 | 7,063 | 6,857 | 7,028 | 7,421 | 7,973 |
| Zapotlanejo-Lagos de Moreno | 9,909 | 10,187 | 9,752 | 10,400 | 10,894 | 11,636 |
| León-Aguascalientes | 8,086 | 8,098 | 7,597 | 8,349 | 8,896 | 9,404 |
| Promedio ponderado | 8,881 | 9,221 | 8,840 | 9,140 | 9,523 | 10,066 |

Fuente: SCT, 2015 y RCO, 2015

Tabla 5 continuación. Tránsito diario en las autopistas del Paquete Centro Occidente

| Autopista | 2013 | 2014 | 2015 | TCMA |
|-----------------------------|---------------|---------------|---------------|-------------|
| Guadalajara-Zapotlanejo | 31,758 | 33,087 | 34,321 | 0.3% |
| Maravatío-Zapotlanejo | 7,873 | 7,776 | 8,227 | 2.8% |
| Zapotlanejo-Lagos de Moreno | 11,927 | 12,255 | 12,933 | 3.4% |
| León-Aguascalientes | 9,814 | 10,568 | 11,365 | 4.3% |
| Promedio ponderado | 10,208 | 10,426 | 11,026 | 2.7% |

Fuente: SCT, 2015 y RCO, 2015

Tabla 6. Ingreso anual en las autopistas del Paquete Centro Occidente (mddUS-2007)

| Autopista | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 |
|-----------------------------|--------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Guadalajara-Zapotlanejo | 40.2 | 40.1 | 40.0 | 39.4 | 39.4 | 39.7 |
| Maravatío-Zapotlanejo | 78.3 | 74.6 | 81.8 | 84.5 | 91.6 | 100.7 |
| Zapotlanejo-Lagos de Moreno | 62.9 | 64.2 | 63.2 | 68.4 | 73.4 | 80.2 |
| León-Aguascalientes | 44.4 | 44.1 | 42.7 | 47.1 | 53.4 | 57.0 |
| Total | 225.9¹ | 223.1 | 227.7 | 239.3 | 257.8 | 277.6 |

| Autopista | 2013 | 2014 | 2015 | TCMA |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Guadalajara-Zapotlanejo | 40.4 | 43.1 | 46.6 | 1.9% |
| Maravatío-Zapotlanejo | 100.6 | 105.8 | 115.1 | 4.9% |
| Zapotlanejo-Lagos de Moreno | 82.5 | 90.9 | 98.8 | 5.8% |
| León-Aguascalientes | 59.7 | 69.2 | 77.8 | 7.3% |
| Total | 283.2 | 308.9 | 338.4 | 5.2% |

Fuente: RCO, 2015

¹ Ingresos del gobierno de 170.8 mddUS de enero a septiembre de 2007 e ingresos del concesionario de 55.1 mddUS de octubre a diciembre de 2007 (La concesión inicia en octubre de 2007)

En el lapso 2000-2007 cuando eran operadas por el gobierno mexicano, el crecimiento del tránsito fue de 7.4% en promedio anual y el aumento de los ingresos a precios constantes fue de 7.1% en el mismo período, lo que indica una alta correlación entre tráfico e ingresos. No obstante, a partir de la concesión entre 2007 y 2015 el tránsito creció solamente 2.7% a tasa anual promedio y los ingresos al 5.2%, el doble que el tráfico. Es decir, en manos del concesionario solamente la mitad de los ingresos se explican por el incremento del tráfico, mientras que la otra mitad se debe al cambio en la composición vehicular dominada por una mayor presencia de camiones pesados, por la actualización de las bases de regulación tarifaria autorizadas por la SCT y por el aumento de los ingresos por servicios auxiliares de las autopistas (RCO, 2015).

Con base en el desempeño del tránsito y de los ingresos de los últimos nueve años se realizó la evaluación de la rentabilidad financiera del grupo de autopistas., el flujo neto se determinó con la diferencia entre los ingresos y los egresos, los valores utilizados en el modelo financiero se consideran a precios constantes de 2007. Los egresos se integraron por los conceptos siguientes: el pago realizado para la obtención de la concesión (4,053.1 millones de dólares), los costos de las obras y trabajos de reconstrucción realizados por el concesionario, los gastos de operación (5% de los ingresos totales según los valores históricos de los estados financieros del concesionario). Los costos de conservación y reconstrucción corresponden con los valores utilizados por la SCT para la conservación periódica anual y la reconstrucción mayor del pavimento aplicada cada 10 años.

Con respecto a los ingresos, se tomaron en cuenta los beneficios reales obtenidos por el concesionario desde la obtención del título de concesión en octubre de 2007 hasta el cierre del año 2015, después de este año se pronosticaron los ingresos para los siguientes años hasta la terminación del plazo de concesión en el año 2042 de acuerdo a la tasa de crecimiento anual del 5.2% que actualmente mantiene el grupo de autopistas.

La tasa interna de retorno (TIR) que obtiene el concesionario es 8.5% y el valor presente neto (VPN) valorado al 10% es negativo en 741.4 millones de dólares, considerando que los ingresos aumentan al 5.2% anual (como lo han hecho en los últimos años). Al realizar el análisis con el valor técnico de referencia de SCT de 1,775.5 millones de dólares como pago inicial, los resultados arrojan una TIR de 16.0% y un VPN de 1,712.8 millones de dólares. El análisis indica que el concesionario realizó un pago muy alto por la obtención de la concesión; no obstante, los otros licitantes ofrecieron valores muy parecidos.

Paquete Pacífico Norte. Originalmente la SCT inició en febrero de 2008 la licitación del segundo grupo de activos denominado Paquete Pacífico integrado por 3 autopistas en operación con 370 km de longitud total y 8 autopistas por construir con una longitud total de 400 km, proyectos ubicados en los estados de Jalisco, Sinaloa y Baja California Sur. Sin embargo, las condiciones económicas poco favorables debido a la crisis financiera mundial de 2008-09 ocasionaron que se presentara un número muy reducido de licitantes con ofertas por debajo de los valores esperados por SCT, por lo que el concurso fue declarado desierto. De este modo, el grupo original de activos fue depurado, disminuyendo los proyectos involucrados y formando dos grupos: el Paquete Pacífico Norte y el Paquete Pacífico Sur.

El paquete Pacífico Norte se integró con la autopista de peaje en operación: Mazatlán-Culiacán de 181.5 km de longitud y la construcción de los Libramientos Sur de Culiacán, de 22 km de longitud, y de Mazatlán, de 38 km de longitud (Tabla 7).

La licitación del paquete Pacífico Norte se realizó entre abril y octubre de 2009, SCT recibió las ofertas del consorcio integrado por ICA y Global Vía que ofreció 130.0 millones de dólares como pago inicial, de la empresa Promotora del Desarrollo en América Latina

(IDEAL) con 257.3 millones de dólares y de OHL Concesiones con 16.0 millones de dólares. La concesión se otorgó a IDEAL quién ofreció el pago inicial más alto.

La autopista Mazatlán-Culiacán mantiene un crecimiento medio anual del tránsito del 3.6% en los últimos siete años. El libramiento de Culiacán en operaciones desde agosto de 2012 tiene 14.0% de crecimiento en cuatro años, pero su volumen diario es bajo considerando que es una vía de cuatro carriles. Por su parte el libramiento de Mazatlán en operaciones desde diciembre de 2014 tiene un tránsito diario mayor y todavía están en proceso de construcción los ramales al Aeropuerto (3.6 Km) y a Mazatlán centro (3.4 Km) de dos carriles de circulación (Tabla 8).

Con respecto a los ingresos anuales, la autopista Mazatlán-Culiacán tiene un crecimiento medio anual de 5.1% entre 2009 y 2015, el Libramiento de Culiacán de 16.4% entre 2012 y 2015 y el Libramiento de Mazatlán no se puede establecer una tasa de crecimiento pues apenas tiene 13 meses de operación, pero sus ingresos en 2015 ya representan el 11.4% de los ingresos anuales del grupo de autopistas y son casi tres veces mayores que los del Libramiento de Culiacán (Tabla 9).

Tabla 7. Características del Paquete Pacífico Norte

| No. | Autopista de peaje en operación | Carriles | Longitud (km) | Inicio operación |
|-----|--|--------------|---------------|------------------|
| 1 | Mazatlán-Culiacán | 4 | 181.5 | Oct-1992 |
| | | Total | 181.5 | |
| No. | Obras | Carriles | Longitud (km) | |
| 1 | Libramiento de Mazatlán (Construcción) | 4 | 38.0 | Dic-2014 |
| 2 | Libramiento Sur de Culiacán (Construcción) | 4 | 22.0 | Ago-2012 |
| | | Total | 60.0 | |

Fuente: SCT, 2011 e IDEAL, 2015

Tabla 8. Tránsito diario en las autopistas del Paquete Pacífico Norte

| AUTOPISTA | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Mazatlán - Culiacán | 4,772 | 4,261 | 4,529 | 5,101 | 5,375 | 5,463 |
| Libramiento de Culiacán | | | | 1,470 | 1,614 | 1,813 |
| Libramiento de Mazatlán | | | | | | 3,228 |
| Promedio ponderado | 4,772 | 4,261 | 4,529 | 4,708 | 4,968 | 4,779 |

| AUTOPISTA | 2015 | TCMA |
|---------------------------|-------|-------|
| Mazatlán - Culiacán | 5,895 | 3.6% |
| Libramiento de Culiacán | 2,179 | 14.0% |
| Libramiento de Mazatlán | 3,501 | 8.5% |
| Promedio ponderado | 5,179 | 1.4% |

Fuente: SCT, 2015 e IDEAL, 2015

Tabla 9. Ingreso anual en las autopistas del Paquete Pacífico Norte (mddUS-2009)

| Autopista | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|-------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Mazatlán-Culiacán | 3.2 ¹ | 30.3 | 30.8 | 33.5 | 34.3 | 35.4 |
| Libramiento de Culiacán | | | | 0.5 | 1.4 | 1.6 |
| Libramiento de Mazatlán | | | | | | 0.2 |
| Total | 3.2 | 30.3 | 30.8 | 34.1 | 35.7 | 37.1 |

| Autopista | 2015 | TCMA |
|-------------------------|-------------|-------------|
| Mazatlán-Culiacán | 38.4 | 5.1% |
| Libramiento de Culiacán | 1.9 | 16.4% |
| Libramiento de Mazatlán | 5.2 | - |
| Total | 45.5 | 8.7% |

Fuente: IDEAL, 2015

¹ Ingresos del concesionario de noviembre a diciembre de 2009 (La concesión inicia en noviembre de 2009)

La rentabilidad se calcula a precios constantes de 2009, siguiendo los criterios utilizados en el Paquete Centro Occidente en lo que respecta al pago por la obtención de la concesión (253.7 millones de dólares), inversión en obras de construcción (195.8 millones de dólares) y costos de operación y mantenimiento. Se determina el flujo de efectivo con los ingresos reales hasta 2015 y las proyecciones hasta el final del plazo de concesión en el año 2039, aplicando la tasa de crecimiento histórica de 5.1% anual. La TIR obtenida es del 10.9% y el VPN calculado al 10% es de 44.9 millones de dólares.

Paquete Pacífico Sur. El proceso de licitación se realizó entre abril y agosto de 2011, el título de concesión fue firmado el 30 noviembre del mismo año, la concesión fue adjudicada a la empresa IDEAL que ofreció un pago de 315.9 millones de dólares. El Paquete Pacífico Sur quedó integrado por la autopista de peaje en operación Guadalajara-Tepic de 168.6 km de longitud y la construcción del Libramiento Sur de Guadalajara de 111 km y del Libramiento de Tepic de 30 km (Tabla 10).

El Libramiento Sur de Guadalajara consiste en la construcción de una autopista de cuatro carriles de pavimento de concreto, que da continuidad al tránsito de largo itinerario que circula entre la zona occidental del país, la obra se integra por tres partes: el tramo I de 30 kilómetros de longitud, inicia en el Entronque Zapotlanejo y termina en el Entronque Chapala en la carretera Guadalajara-Chapala; el tramo II de 35 kilómetros de longitud, inicia en el Entronque Chapala y termina en el Entronque Santa Cecilia, en la autopista Guadalajara-Colima y el tramo III de 46 kilómetros de longitud, inicia en el Entronque Santa Cecilia y termina en la autopista Guadalajara-Tepic, en el Entronque El Arenal, se tiene previsto iniciar operaciones del tramo I en abril de 2016 y de los otros tramos en enero de 2017 (IDEAL, 2015).

El Libramiento de Tepic es una carretera de dos carriles de pavimento asfáltico que se

localiza al noreste de la zona urbana de Tepic para dar continuidad al tránsito de largo recorrido del itinerario Guadalajara-Tepic-Mazatlán. El proyecto inicia en el cruce con la carretera Guadalajara-Tepic y termina en el entronque con la autopista Tepic-Villa Unión, se tiene programado abrir la circulación de esta vía en marzo de 2016 (IDEAL, 2015).

La autopista Guadalajara-Tepic tiene un crecimiento medio anual del tránsito en los últimos nueve años del 1.5%. La captación del tránsito del libramiento de Guadalajara se ha pronosticado con un comportamiento similar al del Arco Norte durante los primeros cuatro años de operación y la del libramiento de Tepic de manera análoga al libramiento de Culiacán. Después del año 2019 se ha considerado un aumento medio anual del 3.3% hasta el 2023 y después de este año de 1.5% (Tabla 11).

Los ingresos del Paquete Pacífico Sur se integran con los ingresos históricos de la autopista Guadalajara-Tepic del período 2011 a 2015 y con el pronóstico de ingresos anuales para las otras autopistas de 2015 al final del plazo de concesión en 2041. Los ingresos anuales de la autopista Guadalajara-Tepic se calcularon a partir de los valores históricos y siguiendo el aumento medio anual del tránsito diario de 1.5%. Los ingresos anuales de los libramientos de Guadalajara y de Tepic se calcularon con base en los pronósticos del tránsito diario (Tabla 12).

La rentabilidad se calcula a precios constantes de 2011, siguiendo los criterios utilizados en los Paquetes anteriores en lo que respecta al pago por la obtención de la concesión (315.9 millones de dólares), inversión en obras de construcción (485.7 millones de dólares) y costos de operación y mantenimiento. Se determina el flujo de efectivo con los ingresos reales hasta 2015 y las proyecciones hasta el final del plazo de concesión en el año 2041, aplicando la tasa de crecimiento histórica del tránsito del 1.5% anual. La TIR obtenida es del 14.0% y el VPN calculado al 10% es de 232.8 millones de dólares.

Tabla 10. Características del Paquete Pacífico Sur

| No. | Proyectos | Carriles | Longitud (km) | Inicio operación |
|-----|---|--------------|---------------|--------------------------------|
| 1 | Guadalajara-Tepic | 2 | 168.6 | Feb-1999 |
| | | Total | 168.6 | |
| No. | Obras | Carriles | Longitud (km) | |
| 1 | Libramiento de Guadalajara (Construcción) | 4 | 111.0 | Abr-2016/Ene-2017 ^E |
| 2 | Libramiento de Tepic (Construcción) | 2 | 30.0 | Mar-2016 ^E |
| | | Total | 141.0 | |

Fuente: SCT, 2011 e IDEAL, 2015

Tabla 11. Tránsito diario en las autopistas del Paquete Pacífico Sur

| Autopista | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Guadalajara-Tepic | 8,143 | 8,550 | 8,579 | 8,779 | 8,912 | 9,158 | 8,839 |
| Libramiento Tepic | - | - | - | - | - | - | - |
| Libramiento Guadalajara | - | - | - | - | - | - | - |
| Promedio ponderado | 8,143 | 8,550 | 8,579 | 8,779 | 8,912 | 9,158 | 8,839 |

| Autopista | 2014 | 2015 | TCMA |
|---------------------------|-------|-------|------|
| Guadalajara-Tepic | 8,887 | 9,180 | 1.5% |
| Libramiento Tepic | - | - | - |
| Libramiento Guadalajara | - | - | - |
| Promedio ponderado | 8,887 | 9,180 | 1.5% |

Fuente: SCT, 2015 e IDEAL, 2015

Tabla 12. Ingreso anual en las autopistas del Paquete Pacífico Sur (mddUS-2011)

| Autopista | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 ^E | 2017 ^E |
|-------------------------|------------------|------|------|------|------|-------------------|-------------------|
| Guadalajara-Tepic | 7.3 ¹ | 81.8 | 78.6 | 79.1 | 83.1 | 84.3 | 85.6 |
| Libramiento Guadalajara | | | | | | 3.1 | 21.4 |
| Libramiento Tepic | | | | | | 1.4 | 2.1 |
| Total | 7.3 | 81.8 | 78.6 | 79.1 | 83.1 | 88.8 | 109.1 |

| Autopista | 2018 ^E | 2019 ^E | 2020 ^E | TCMA |
|-------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
| Guadalajara-Tepic | 86.9 | 88.2 | 89.5 | 1.1% |
| Libramiento Guadalajara | 29.8 | 41.6 | 43.0 | 26.2% |
| Libramiento Tepic | 2.3 | 2.5 | 2.6 | 7.7% |
| Total | 119.0 | 132.3 | 135.1 | 6.5% |

Fuente: IDEAL, 2015

¹ Ingresos del concesionario de diciembre de 2011 (La concesión inició el 1° de diciembre de 2011) E = Estimado

Paquete Michoacán. La licitación de este Paquete se llevó a cabo entre 2010 y 2011, en el concurso participaron ocho empresas, aunque solamente la empresa Autopistas de Michoacán presentó propuesta económica, la cual resultó ganadora del concurso al ofrecer un pago de 58.7 millones de dólares por la explotación de las tres autopistas que unen Pátzcuaro-Uruapan-Nueva Italia-Lázaro Cárdenas con una longitud total de 272.2 km, así como la construcción de los libramientos de Morelia de 64.1 km y de Uruapan de 25.2 km de dos carriles y la ampliación a cuatro carriles del tramo Pátzcuaro-Uruapan, el título de concesión se firmó el 30 de marzo de 2012 (Tabla 13).

Las autopistas entregadas para explotación del concesionario tienen al menos 15 años en operación, el tránsito medio anual en el período 2007-2015 ha crecido 1.8% en la autopista

Pátzcuaro-Uruapan, 2.5% en la Uruapan-Nueva Italia y 2.4% en la Nueva Italia-Lázaro Cárdenas, mientras el promedio ponderado ha crecido al 2.2% sin considerar el tramo de 30 km del Libramiento de Morelia que inició operaciones en abril de 2015 (Tabla 14).

Los ingresos anuales de las autopistas del Paquete Michoacán se pronostican con el aumento anual del tráfico del 2.8% que han tenido las vías Pátzcuaro-Uruapan, Uruapan-Nueva Italia y Nueva Italia-Lázaro Cárdenas en el período 2012-2015, exceptuando el período 2016-2020 para el Libramiento de Morelia cuyos ingresos se estimaron al 8.4% de acuerdo con el desempeño obtenido en el año 2015 y para el Libramiento de Uruapan cuyos ingresos se estimaron con los datos del Libramiento de Tepic (Tabla 15).

La rentabilidad se calcula a precios constantes de 2012, siguiendo los criterios utilizados en los Paquetes anteriores en lo que respecta al pago por la obtención de la concesión (58.7 millones de dólares), inversión en obras de construcción (478.8 millones de dólares) y costos de operación y mantenimiento. Se determina el flujo de efectivo con los ingresos reales hasta 2015 y las proyecciones hasta el final del plazo de concesión en el año 2042, aplicando la tasa de crecimiento histórica del tránsito del 2.8% anual. La TIR obtenida es del 14.9% y el VPN calculado al 10% es de 137.6 millones de dólares.

Tabla 13. Características del Paquete Michoacán

| No | Proyectos | Carriles | Longitud (km) | Inicio operación |
|----|---------------------------------------|--------------|---------------|------------------------------------|
| 1 | Pátzcuaro-Uruapan | 2 | 56.0 | Sep-1998 |
| 2 | Uruapan-Nueva Italia | 2 | 60.0 | Nov-2000 |
| 3 | Nueva Italia- Lázaro Cárdenas | 2 | 156.2 | Oct-2001 |
| | | Total | 272.2 | |
| No | Obras | Carriles | Longitud (km) | |
| 1 | Libramiento de Morelia (Construcción) | 2 | 64.1 | Abr-2015/ Ene-2017 ^E |
| 2 | Pátzcuaro-Uruapan (Ampliación) | 4 | 56.0 | Ene-2017 ^E |
| 3 | Libramiento de Uruapan (Construcción) | 2 | 25.2 | Ene-2017 ^E |
| | | Total | 145.3 | |

Fuente: SCT, 2011 y PINFRA, 2015

E=Estimado

Tabla 14. Tránsito diario en las autopistas del Paquete Michoacán

| Autopista | 2007 | 2008 | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 |
|------------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Pátzcuaro-Uruapan | 7,804 | 8,792 | 8,758 | 8,678 | 8,493 | 8,573 | 9,197 |
| Uruapan-Nueva Italia | 5,517 | 6,346 | 6,347 | 6,444 | 6,237 | 6,424 | 6,608 |
| Nueva Italia-Lázaro Cárdenas | 3,428 | 3,879 | 3,645 | 3,651 | 3,327 | 3,528 | 3,985 |
| Libramiento de Morelia | | | | | | | |
| Promedio ponderado | 4,789 | 5,434 | 5,292 | 5,301 | 5,031 | 5,204 | 5,635 |

| Autopista | 2014 | 2015 | TCMA |
|------------------------------|-------------|--------------------|-------------|
| Pátzcuaro-Uruapan | 7,771 | 8,967 | 1.8% |
| Uruapan-Nueva Italia | 5,537 | 6,730 | 2.5% |
| Nueva Italia-Lázaro Cárdenas | 3,391 | 4,130 | 2.4% |
| Libramiento de Morelia | | 2,277 ^N | - |
| Promedio ponderado | 4,765 | 5,698 | 2.2% |

Fuente: SCT, 2015 y PINFRA, 2015

N = No se considera en el promedio ponderado

Tabla 15. Ingreso anual en las autopistas del Paquete Michoacán (mddUS-2012)

| Autopista | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016^E | 2017^E | 2018^E |
|------------------------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Pátzcuaro-Uruapan | 9.4 | 14.6 | 14.3 | 16.8 | 17.3 | 17.8 | 18.3 |
| Uruapan-Nueva Italia | 8.5 | 13.2 | 12.0 | 14.9 | 15.4 | 15.8 | 16.2 |
| Nueva Italia-Lázaro Cárdenas | 13.7 | 21.2 | 19.4 | 24.1 | 24.8 | 25.5 | 26.2 |
| Libramiento de Morelia | | | | 1.8 | 2.5 | 2.8 | 3.0 |
| Libramiento de Uruapan | | | | - | | 1.4 | 2.1 |
| Totales | 42.0 ¹ | 49.0 | 45.7 | 57.6 | 60.0 | 63.2 | 65.8 |

| Autopista | 2019^E | 2020^E | TCMA |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------|
| Pátzcuaro-Uruapan | 18.8 | 19.3 | 9.3% |
| Uruapan-Nueva Italia | 16.7 | 17.2 | 9.2% |
| Nueva Italia-Lázaro Cárdenas | 27.0 | 27.7 | 9.2% |
| Libramiento de Morelia | 3.2 | 3.5 | 12.1% |
| Libramiento de Uruapan | 2.3 | 2.5 | 15.3% |
| Totales | 68.0 | 70.2 | 6.6% |

Fuente: PINFRA, 2015

¹ Ingresos del gobierno de 10.4 mddUS de enero a marzo de 2012 e ingresos del concesionario de 31.6 mddUS de abril a diciembre de 2012 (La concesión inició el 31 de marzo de 2012) E=Estimado

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El porcentaje de aumento anual del tránsito antes y después de la adjudicación de las concesiones disminuye en todos los grupos de autopistas: en el Paquete Centro Occidente pasa de 7.4% a 2.7%, en el Paquete Pacífico Norte baja de 4.2% a 3.6%, en el Paquete Pacífico Sur disminuye de 2.3% a solamente 0.7% y en el Paquete Michoacán de 5.3% a 2.8%; situación que explica los valores de TIR y de VPN estimados para cada Paquete. Asimismo, se determinó que factores como el pago inicial para obtener la concesión, el ingreso anual de cada paquete al momento de la licitación y el costo de las obras de construcción tienen un efecto importante en la rentabilidad (Tabla 16).

De este modo, el análisis del pago por la concesión determina que el paquete Centro Occidente fue concesionado a razón de 1.816 millones de dólares por cada kilómetro-carril de autopista en operación, el Pacífico Norte en 0.349 millones de dólares, el Pacífico Sur en 0.468 millones de dólares y el Michoacán en solamente 0.108 millones de dólares. Mientras que los ingresos por kilómetro-carril en el momento de la concesión fueron en el Paquete Pacífico Sur (0.118 millones de dólares) 16.8% mayores que los del grupo Centro Occidente (0.101 millones de dólares), 40.5% que los del Paquete Michoacán (0.084 millones de dólares) y 168.2% que los del Paquete Pacífico Norte (0.044 millones de dólares). Por último, al realizar un análisis simplificado del tiempo requerido para recuperar el pago inicial con los ingresos anuales de cada Paquete se necesitarían 18.0 años para el Centro Occidentales, 8.0 años en el Pacífico Norte, 4.0 años en el Pacífico Sur y sólo 1.3 años en el Michoacán.

4. CONCLUSIONES

El modelo de aprovechamiento de activos se ha convertido en una alternativa al financiamiento de los programas carreteros del gobierno mexicano y ha permitido disminuir en términos absolutos la deuda del rescate, ya que en las cuatro licitaciones efectuadas entre 2007 y 2012 se han captado recursos por 4,681 millones de dólares.

A pesar de que este esquema concesiona autopistas de peaje con muchos años de operación en las que en principio los niveles de tránsito deberían mostrar cierta estabilidad. Sin embargo, esto no ha sucedido en los proyectos concesionados con este modelo, ya que el aumento medio anual del tráfico ha disminuido entre la mitad y la tercera parte, dependiendo del grupo de autopistas, después del proceso de licitación. Por lo que el tránsito se ha transformado en un factor de riesgo disminuyendo la rentabilidad de los concesionarios.

Asimismo, se muestra que las licitaciones en las que el pago por la concesión es de 4 y 8 veces el valor de los ingresos anuales puede esperarse una rentabilidad adecuada para el concesionario (TIR entre 11% y 14%), como es el caso de los Paquetes Pacífico Norte y Pacífico Sur. En tanto, en el Paquete Centro Occidente donde el pago por la concesión con respecto a los ingresos anuales está en proporción de 18 a 1, la rentabilidad es muy baja

(TIR=8.5%) y sólo ha sido compensada en parte por la actualización de las tarifas. Aunque es importante señalar que el costo de las obras asociadas a cada paquete también influye en la rentabilidad de los proyectos, como es el caso del Paquete Michoacán en el que la relación pago inicial contra ingresos anuales es de solamente 1.3, pero el costo de las obras es de 10.5 veces los ingresos anuales, mientras que en los paquetes del Pacífico es de alrededor de 6 veces y en el Paquete Centro Occidente de solamente 0.6 veces.

Tabla 16. Indicadores de rentabilidad (mddUS)

| Paquete | Centro Occidente | Pacífico Norte | Pacífico Sur | Michoacán |
|--|-------------------------|-----------------------|---------------------|-------------------|
| Datos autopistas / Año | 2007 | 2009 | 2011 | 2012 |
| Km de autopista en operación | 558.0 | 181.5 | 168.6 | 272.2 |
| Total km-carril en operación | 2,232.0 | 726.0 | 674.4 | 544.4 |
| Datos económicos (mddUS) | | | | |
| Ingreso en el año de concesión | 225.5 | 31.7 | 79.8 | 45.6 |
| Ingreso por km-carril | 0.101 | 0.044 | 0.118 | 0.084 |
| Pago por la concesión | 4,053.1 | 253.7 | 315.9 | 58.7 |
| Pago por km-carril | 1.816 | 0.349 | 0.468 | 0.108 |
| Años de recuperación | 18.0 | 8.0 | 4.0 | 1.3 |
| Costo de las obras (mddUS) | | | | |
| Costo total | 131.1 | 195.8 | 485.7 | 478.8 |
| Total km-carril | 199.4 | 240.0 | 504.0 | 290.6 |
| Costo por km-carril | 0.657 | 0.816 | 0.964 | 1.647 |
| Rentabilidad del concesionario | | | | |
| % histórico de ingresos con el concesionario | 5.2% | 5.1% | 1.5% | 2.8% ¹ |
| TIR | 8.5% | 10.9% | 14.0% | 14.9% |
| Rentabilidad con el valor técnico de referencia | | | | |
| Valor técnico de referencia | 1,775.5 | N.D. | N.D. | 51.9 |
| TIR | 16.0% | - | - | 15.3% |
| Rentabilidad antes del concurso | | | | |
| % histórico de ingresos antes de la concesión | 7.1% | 5.5% | 3.9% | 5.3% ¹ |
| TIR | 10.0% | 13.8% | 22.5% | 92.3% |

Fuente: Elaboración propia

¹ Porcentaje de aumento del tránsito. N.D.=No disponible

En este sentido, es recomendable cuidar la integración de los paquetes de autopistas en operación, la estabilidad de los mercados financieros y que los indicadores económicos del país sean favorables durante la etapa de licitación de los proyectos para obtener la mayor cantidad de recursos para el gobierno. Asimismo, mejorar la estimación del valor técnico de referencia, pues en las licitaciones de los Paquetes Pacífico Sur y Michoacán los pagos obtenidos por el gobierno mexicano parecen bajos en comparación con los resultados de rentabilidad financiera obtenidos en este trabajo. En sentido opuesto, es conveniente revisar si los pagos para obtener el título de concesión deben contar con un límite superior para evitar propuestas muy por encima del valor técnico de referencia que pueden ocasionar baja

rentabilidad de los proyectos concesionados.

REFERENCIAS

- AUDITORÍA SUPERIOR DE LA FEDERACIÓN, ASF. (2014). *Informe del resultado de la fiscalización superior de la cuenta pública 2013*, Cámara de Diputados, México.
- CARPINTERO, J. Y GÓMEZ-IBAÑEZ, J. A., (2011). *Mexico's private toll road program reconsidered*. Transport Policy 18, pp 848-855.
- DE BUEN, O. (2011). *Últimos desarrollos y tendencias en materia de financiación de infraestructuras y APPs en México*. Deloitte Infra-estructura No. 1, pp. 40-45
- EPELT, R. (2011) *La participación privada en el desarrollo de las infraestructuras en México*. Deloitte Infra-estructura No. 1, pp. 34-39
- GÓMEZ-IBAÑEZ, J. A., (1997). *Mexico's private toll road program*. Kennedy School of Government, Harvard University, USA.
- IMPULSORA DEL DESARROLLO Y EL EMPLEO DE AMÉRICA LATINA, IDEAL. (2015). *Informes de 2009 a 2015 a la Bolsa Mexicana de Valores*. México
- PROMOTORA Y OPERADORA DE INFRAESTRUCTURA, PINFRA. (2015). *Informes de 2012 a 2015 a la Bolsa Mexicana de Valores*. México.
- RED DE CARRETERAS DE OCCIDENTE, RCO. (2015). *Informes de 2008 a 2015 a la Bolsa Mexicana de Valores*. México.
- RUSTER, J., (1997). *A retrospective on the Mexican toll road program (1989–1994)*, *Public Policy for the Private Sector*, Note no. 125. The World Bank Group, Washington D.C., USA
- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (1995). *Programa Nacional de Autopistas 1989-1994 Propósitos y Logros*. México
- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (2011). *Diseño y gestión de proyectos carreteros en asociaciones público privadas*. XXIV Congreso Mundial de Carreteras PIARC septiembre de 2011, Ciudad de México.
- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (2015). *Datos viales de 2001 a 2015*. México
- WORLD BANK (2003). *Private solutions for infrastructure in Mexico*. Washington, D.C., USA.

50 Financial feasibility of pipeline and road modes integration for ethanol transportation in Brazil

Miller José Vargas Gonzaga

Iltón Curty Leal Junior

Pitias Teodoro

Fluminense Federal University – UFF, Brazil

Vanessa de Almeida Guimarães

Federal Center of Technological Education Celso Suckow da Fonseca – CEFET/RJ, Brazil

Juliana Monteiro Lopes

Fluminense Federal University – UFF, Brazil

ABSTRACT

The current crisis in the sugar and ethanol industry could undermine the viability of a pipeline project to transport ethanol that is under construction in the Center-South region of Brazil. Besides, it could make real the possibility of just a partial construction. Thus, it is necessary to evaluate the effect that the closure of the construction could bring to the financial attractiveness of the pipeline project as well as the alternatives that could increase its attractiveness. The investment in a multimodal transport system for ethanol appears as a possible solution. In this context, this paper seeks to answer what should be the effect on the financial feasibility of the pipeline project when it is integrated into a road transport project to collect the ethanol from the plants in the Center-South region of Brazil. The results showed that, although the integration increases the attractiveness of the project, if the pipeline were built just until the analyzed stretch, it would not be financially viable, even including the road service.

Keywords: ethanol, road transport, pipeline transport, multimodal transport and financial feasibility.

1. INTRODUCTION

The financial feasibility for ethanol transport by pipeline in Brazil has already been questioned by some studies as Andriolli (2009) and Barros and Wanke (2012). Besides, the current crisis in the sugar and ethanol industry (SEAB, 2014) can impact on the profitability of production plants and, also, derail or make less attractive projects to build pipelines for ethanol transportation. For instance, it could reduce the number of production plants (due to

the decreasing profits), reducing the ethanol production and, consequently, undermining the financial viability of the pipeline projects. Then, considering that a project has been deployed in the Central-South region of Brazil, it should be reviewed and improved in order to ensure that income levels will be in balance with investments.

Among the potential improvement actions for this project, offering the road transport service between the ethanol production plants and the pipeline terminals (by the same company that operates the pipeline) shows up as a possibility. We believe that the multimodal transport could bring technical and financial advantages to pipeline operation. From this assumption, this paper seeks to answer the following question: What would be the effects on the financial feasibility of a pipeline project if it were integrated to a road project, aiming to collect the ethanol produced in plants located in the Center-South region of Brazil?

Thus, this paper aims to evaluate the effects of offering the road transport service from ethanol plants to pipelines terminals on the financial feasibility of a project of building an ethanol pipeline infrastructure in the South-Central region, in Brazil. We assumed that only a single company would be responsible for the construction and operation of this multimodal system, although partnerships between companies could occur in this venture. To meet the objective of this work, two analyses are performed: (i) the financial viability of the ethanol transferring operation between the pipeline collection terminals and a refinery, carried out by pipeline mode; and (ii) the financial viability of the integrated operations - collection and transferring - where ethanol is collected from ethanol plants to pipeline terminals by road mode, and then is transferred to a refinery by pipeline.

We analyzed the ethanol transport from plants located only in the coverage regions of pipelines terminals that are currently in operation: Ribeirao Preto terminal, in São Paulo state, and Uberaba terminal, in Minas Gerais state. It is important to highlight that some changes in the sugar and ethanol sector after the start of the pipeline construction in the South-Center region could interfere in the current and future viability of the venture. This could justify the cancellation of construction of the others planned stretches and the reallocation of investments in the acquisition of vehicle fleets to transport ethanol at close distances.

In this context, the projected cash flow was compared considering, at first, only the provision of pipeline transportation service and, subsequently, considering the integrated provision of pipeline transportation to road transport service to the plant-terminal stretches. In the feasibility analysis, it was used capital budgeting techniques such as Net Present Value (NPV) and Internal Rate of Return (IRR).

From this introduction, this paper is presented in four sections: (1) an overview of the status of ethanol and its transport in Brazil; (2) the methodological procedures to collect the information and assess the financial viability of projects; (3) discussion of results; and (4)

final considerations, including limitations and opportunities in further studies.

2. OVERVIEW OF THE ETHANOL'S PRODUCTION AND TRANSPORT IN BRAZIL

Since 2003, a series of global events contributed to the international promotion of ethanol, such as: the invasion of Iraq by the United States in March, 2003, bringing out the strategic question of oil dependency; the ravages of Hurricane Katrina in August, 2005, in the southern region of the United States, highlighting the threat that represents the global warming caused by greenhouse gases; the significant increases in oil prices, from 2005; and President Bush's visit to Brazil, in 2007, leading the ethanol to the international media (Bressan Filho, 2006; Niemeyer, 2009).

The year 2003 is also considered a milestone for the development of ethanol in Brazil, considering that the flex car was released in this year. This type of car had a highly acceptance among Brazilian drivers: in three years, the flex-fuel vehicles already accounted over 70% of all vehicles registered in the country. In this context, investments were made in this sector in order to meet the growing of national and international demands. Between 2002 and 2010, more than 100 plants to produce ethanol were built in the country (Bressan Filho, 2006; Lima et al., 2013; Farina, Rodrigues and Sousa, 2013; UNICA, 2014).

However, structural changes have been occurring in the sugar and ethanol industry in recent years. In 2010, Brazil had 440 production units in operation, while in 2013 this number dropped to 388 units. According to EPE (2014), this fact was caused by a restructuring of this sector with mergers and acquisitions, along with investment reduction in new units and closure of others. Due to the productive concentration, the South-Central region was the one that recorded the largest losses of investments.

Between 2007 and 2013, 78 plants were closed and the number of new plants opened per year was also reduced. Furthermore, changes in this scenario are not expected until 2016. In 2014, the Brazilian plants of sugar and ethanol industry had debts totaling approximately, R\$ 70 billion, as result of large investments without the revenue growth (EPE, 2014; SEAB, 2014).

In Brazil, the ethanol transport is traditionally performed by road mode (Rodrigues, 2007a). However, as a result of a consortium of companies, there is a project in course, composed by pipelines and waterways under construction in the country that seeks to create a multimodal transport system for ethanol transportation from South-Central region. At the end of the project, the system will pass through five states and 45 municipalities. It will have 1,330 km long, with capacity to transport 22 million m³ of ethanol per year and total storage capacity of 1.2 million m³ (EPE, 2014).

Rodrigues (2007b) highlights as benefits of multimodal transport: (i) combination of convenience and legal-administrative simplicity found on unimodal transport to the economic-energetic efficiency, with only one responsible for the cargo; (ii) operational aspect - the cargo is carried in an indivisible and inviolable way; (iii) systemic feature - the cargo moves easily among the various modes of transport; and (iv) fiscal aspect - the cargo is inspected only at the origin or destination.

In this context, Xie et al., (2014) compared the ethanol transportation costs from unimodal and multimodal systems and found that multimodal costs would be 25% lower than unimodal transport costs. This fact can be explained by the economy of scale obtained when choosing the most suitable mode of transport according to the volume of cargo (Pootakham and Kumar, 2010). Multimodal systems are less sensitive to costs (considering the distance restriction), since each mode can operate at its optimum condition regarding the following dimensions: availability, speed and flexibility.

3. METHODOLOGICAL PROCEDURES

For this paper, we did a bibliographic and documentary research (Gil, 2002). Complementarily, semi-structured interviews (Hair et al., 2005) were carried out between September and October, 2014. Professionals from ethanol plants of Brazilian companies that perform the handling activity, storage and transportation of ethanol (by pipeline and by road) were interviewed. The interviews aimed to collect additional information to define the features that would be used to assess the pipeline unimodal project and the multimodal project (road + pipeline); and to understand the possible effects of the sugar and ethanol industry crisis on both projects.

During the interviews, one of the experts indicated the *ZAP Frete* as a tool to estimate the transport costs and fares that would be applied to assess the road project. It is provided by *Zap Logística* and uses a database that is updated every month (Zap Logística, 2014).

Regarding the researched context, this paper is focused on ethanol transportation from the Central-South region of Brazil. The objects under analysis are the pipeline, road and multimodal transportation of ethanol whose origins are ethanol production plants located in different cities around a pipeline under construction.

The pipeline begins at the city of Paulinia, in the state of São Paulo - SP, it is planned to go to the city of Jataí, state of Goiás - GO, also passing through the state of Minas Gerais - MG. It is important to mention that the analysis is restricted to the two stretches of the pipeline, whose construction was completed in 2014. They connect the cities of Paulinia (SP) and Uberaba (MG), totaling 352 km (of 906 km that were planned in the project).

In order to assess the financial feasibility of the collection and transferring operations of

ethanol from the producing regions to the refinery - destination point of pipeline project -, the construction of the pipeline and the acquisition of the vehicle fleet were considered. Besides, the following steps were carried out: (1) mapping the plants and creating the coverage regions of the pipeline terminals; (2) defining the characteristics of the pipeline, road and multimodal projects; (3) preparing cash flows and applying the capital budgeting techniques NPV and IRR.

3.1 Mapping the plants and creating the coverage regions of the pipeline terminals

The mapping of plants located around each pipeline terminal was based on the prior definition of a coverage radius and the information of names, cities and states of the plants with ownership ratified in ANP (2014b). First, based on the National Agency of Petroleum (ANP) report, the plants and their respective municipalities, which belong to the states where the analyzed pipeline was built, were considered.

Subsequently, the Google Maps tool was used to check if the origin's municipality was into the coverage area of an ethanol terminal. If a municipality was pointed into the radius of coverage of two terminals, we considered it as belonging to the coverage region of the nearest terminal.

The amount produced in the selected regions was estimated considering the installed capacity of the ethanol plants (ANP, 2014b) and the current production of São Paulo and Minas Gerais states, regarding the harvest of 2013/2014 (CONAB, 2014).

3.2 Defining the features of pipeline, road and multimodal projects

At this stage, we established the size of the road vehicles fleet required to transport ethanol from plants to pipelines terminals (in the multimodal project). It supported the definition of the investment required in the road project and transportation costs.

3.3 Preparing cash flows and applying the capital budgeting techniques NPV and IRR

Cash flow was prepared according to Gitman and Madura (2003), considering the financial information estimated for the pipeline project and financial information used in the road project. The feasibility assessment applying NPV and IRR techniques were done according to Brasil (2002) and Gitman and Madura (2003). Cash flows, NPV and IRR were calculated, individually, for each type of project and, then, in an integrated way, considering a multimodal scenario.

4. DISCUSSIONS OF THE FINDINGS

The pipeline construction was developed in five phases, represented by five terminals and five stretches (Figure 1). As terminals, we have: 1) Ribeirão Preto (SP); 2) Uberaba (MG); 3) Itumbiara (GO); 4) Quirinópolis (GO) and 5) Jataí (GO). As stretches: 1) Ribeirão Preto (SP) to Paulínia (SP); 2) Uberaba (MG) to Ribeirão Preto (SP); 3) Itumbiara (GO) to Uberaba (MG); 4) Quirinópolis (GO) to Itumbiara GO) and 5) Jataí (GO) to Quirinópolis (GO).

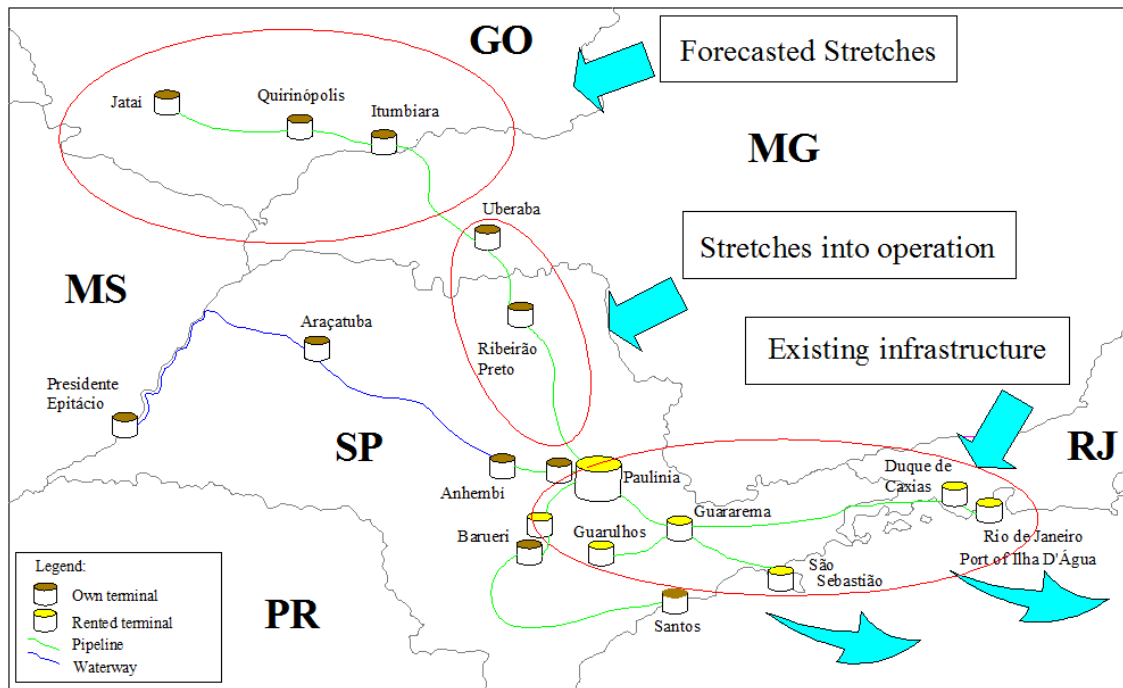


Figure 1. System for ethanol transport in the South-Central region

Source: Adapted from Gonzaga, 2015

From the *Refinaria do Planalto Paulista - REPLAN* (in Paulínia/SP), the pipeline is connected to the existing pipeline network of a partner company to send the ethanol to the terminals and ports in the two states with the largest economic activity in Brazil: São Paulo and Rio de Janeiro.

Besides the pipeline, the project under construction in the South-Central region also includes a waterway, as show in figure 1. Although the original project does not foresee the road transport services - neither ethanol collection in the plants nor delivery it to the final customers - the multimodal nature of the project makes it possible to offer this transportation service in the future, if the market conditions are favorable.

4.1 Mapping the plants and creating coverage regions of pipeline terminals

For mapping the plants, the coverage radius of each terminal was considered 200 km, based on Fleury (2005) that establishes the average distance to the ethanol primary flows. Then, in the coverage region of the Ribeirão Preto terminal were set 53 plants, located in 40 municipalities, accounting 5,289,870 m³ of ethanol. In the coverage region of the Uberaba terminal, there were 17 plants, located in 13 municipalities, accounting 1,901,825 m³ of ethanol.

4.2 Defining the features of pipeline, road and multimodal projects

The pipeline project for the Uberaba-Ribeirão Preto stretch is composed of an ethanol capture and pumping terminal, located in Uberaba / MG. It comprises six storage tanks, an ethanol capture terminal (located in Ribeirão Preto / SP) and an interconnection pipeline

between the Uberaba terminal and the REPLAN refinery. The maximum catchment capacity of Ribeirão Preto terminals and Uberaba is, respectively, 4,300,000 m³ and 1,900,000 m³ of ethanol per year.

It is noteworthy that the volumes of ethanol produced in the coverage areas of such terminals are higher than their capture capabilities. Thus, in order to establish the size of the fleets necessary to carry ethanol from plants located around each terminal, we considered that the annual production to be transported by pipeline should be equal to its capture limit.

The fleet size was based on Valente et al., (2008), applying the following parameters: distance between plant and terminal [km], vehicle speed [km / h], time to go / time to return [h], number of trips per year and amount of ethanol transported per year [m³].

At this stage, it was also considered load, unload and hold times. The type of the vehicle would be bottom load. In addition, to the freight remuneration purposes, we assumed that the vehicle would make a full round-trip and an empty return trip. Based on that, we found that it would be necessary 214 and 93 vehicles to transport ethanol from Ribeirão Preto and Uberaba, respectively.

As road vehicle, we considered a truck of the super-heavy type that costs R\$ 385,000.00, and a bi-tow component that costs R\$ 138,890.00. This vehicle contains 7 axes and its capacity is 45 m³. The prices related to the vehicle were estimated by Zap Frete tool.

The multimodal project resulted from the integration of the transferring and collection projects, can be described as: the pipeline would be built to reach Uberaba and the company would acquire a road vehicle fleet to transport ethanol from plants to Ribeirão Preto and Uberaba to the pipelines terminals.

4.3 Preparing cash flows and applying the capital budgeting techniques NPV and IRR

In the cash flows of the pipeline project, the values related to investments included, beyond the pipeline itself, all the infrastructure and components required for its construction, such as: terminals, valves, easements, environmental licenses, pump stations, automation network and communication systems. Regarding the costs, we considered: operation and maintenance contract, rental / leasing of way, electricity, insurance, labor and spare parts. Considering that the cost values obtained in interviews were not divided into fixed and variable, it was considered that the fixed costs would represent 8.82% of total costs, as Pootakham and Kumar (2010).

The annual investment, fixed cost, variable cost and revenue information of the pipeline and road projects are shown in Table 1.

Table 1. Financial information of the pipeline and road projects

| Project type | Coverage region | Investment [R\$] | Fixed cost [R\$/year] | Variable cost [R\$/year] | Total cost [R\$/year] | Revenue [R\$/year] |
|--------------|-----------------|------------------|-----------------------|--------------------------|-----------------------|--------------------|
| Pipeline | Ribeirão Preto | 993,000,000 | 3,439,800 | 35,560,200 | 39,000,000 | 109,260,550 |
| | Uberaba | 535,000,000 | 1,852,200 | 19,147,800 | 21,000,000 | 89,845,236 |
| Road | Ribeirão Preto | 111,932,125 | 22,227,566 | 53,694,909 | 75,922,475 | 125,705,790 |
| | Uberaba | 48,531,057 | 9,016,497 | 20,171,031 | 29,187,529 | 55,352,345 |

Source: Gonzaga, 2015

*The tariff used to calculate the revenue for pipeline transportation from Ribeirão Preto and Uberaba terminals were respectively, R\$0.1228/m³/ km and R\$ and 0.1343R\$/m³/ km. The average tariff of road routes that served as the basis to calculate the revenue for road transport to the Ribeirão Preto and Uberaba terminals were, respectively, R\$0.3272/m³ / km and R\$0.3462/m³/ km.

In order to preparing the cash flows for the road project, the values related to the investments were calculated based on the price of the bi-tow road vehicle (which was estimated by Zap Frete tool as R\$ 523,890) and fleet size to transport the ethanol from each municipality. Fixed and variable costs were calculated based on unit costs estimated by the same tool.

As fixed cost, we considered: licensing, vehicle insurance, costs with Safety, Environment and Health (SEH), driver and helper salary and Administration Costs in Travel (ACV). While as variable cost, we took into account: fuel, lubricants, undercarriage, washing, cargo insurance, food and lodging, vehicle maintenance, toll, and cargo heating with blowtorch.

Although the Ribeirão Preto-Paulinia stretch has started its operation in 2013; the Uberaba-Ribeirão Preto stretch was released just in 2014. However, in this paper, we considered that both parts started their operations in the same year, in order to calculate the cash flow. These were drawn up in constant currency, as adopted in Andriolli (2009).

The equations and the calculations of the cash can be found in Gonzaga (2015). As adopted for this author, the pipeline lifetime was estimated in 25 years, while the lifetime of the road project was estimated in five years. Due to the difference between the useful life of the assets involved in each project, in order to prepare of cash flows, we have considered a new investment (representing the replacement of the fleet) each 5 years, until the two projects reaches the same duration: 25 years.

In addition, we assumed that the residual value for the pipeline project would be equal to the depreciation of the last year of the project. For the road project, the residual value was estimated by the Zap tool considering the value of a vehicle at the end of five years (its useful

lifetime). It resulted in R\$ 351,422 value that includes the complete truck (the bi-tow truck). Based on the projected cash flows, NPV and IRR were calculated, as is presented in Table 2.

Assessing the ethanol transferring operation (pipeline project), it was found that the NPV is negative and the IRR is below the discount rate - SELIC - that was used to evaluate the financial viability (10.9%). In the assessment of the ethanol collection operation (road project), it was found that the NPV is positive and the TIR is superior to the discount rate. Considering the individual operations - collection and transferring - the first has a surplus, the second does not. Nevertheless, the integration of these operations has a greater outcome when compared to the initial proposal of the project - just transferring. However, it is still not enough to make the project viable.

4.4 Alternatives to enable the ethanol transferring project by pipeline in the Center-South region of Brazil

In order to improve the outcome of the venture, an increase in inflows and/or a reduction in outflows are required (being even better if both of them occurs, simultaneously). The inflows are represented by sales revenues, which are related to the “quantity” and price of the offered services. Since the prices are related to market practices, being difficult for a company to change them, they will not be considered. Nevertheless, the increase in the catchment capacity of Ribeirão Preto and Uberaba terminals should be considered, especially because, currently, the storage capacity of these terminals is close to the production volume in both regions.

Disbursements are related to costs, expenses, taxes and return on investments (interest and dividends). As costs and expenses are related to the market practices and taxes fiscal policies, (and the companies hardly ever can influence on them), they will not be considered. Assuming that the company has no shares traded on the stock exchange, there are no dividends payable; so, funding's sources with interest rates different from those adopted in the study could contribute to improved results.

Table 2. NPV and IRR analysis of ethanol transferring and collection operations, in the Central-South region of Brazil.

| Closure terminal | Technical | Projects | | |
|------------------|-----------|---|--|---------------------------|
| | | Transferring (Pipeline construction and operation) | Collection (Acquisition and operation of vehicles fleets) | Transferring + collection |
| Uberaba | NPV | -R\$ 744,325,526.02 | R\$ 40,791,702.53 | -R\$ 661,589,951.11 |
| | IRR | 3.53% | 22.67% | 5.15% |

Source: Gonzaga, 2015

Two other options should also be considered as attempts to improve the current outcome: a change in the original strategy, incorporating the collection operation; and the change in the useful life of the assets, increasing the period in which they could generate positives cash flows.

4.4.1 Increasing catchment capacity of Ribeirão Preto and Uberaba terminals

In order to make the project viable by changing only the catchment capacity, the production volume in plants located in the coverage region of the Ribeirão Preto terminal (5,289,870 m³) and Uberaba terminal (1,901.825 m³) would have to increase 100%, reaching a productive volume of 10,622,078 m³ in Ribeirão Preto and 3,818,864 m³ in Uberaba.

Based on recent performance of this sector and considering that the growth rates will remain stable, this would occur in 11 years from now, since ethanol production in the Center-South region had increased 100% between 2004 and 2015, increasing from 13.013 million m³ of ethanol in the 2003/2004 to of 26.146 million m³ of ethanol in the 2014/2015 (UNICA, 2015).

In this case, the initial alternative of unimodal transferring operation would be viable, having the stretch to Uberaba and the Selic rate of 10.9% maintained. The results of this projection are presented in Table 3.

If we consider the integration of the collection (road project) and transferring (pipeline project) operations, the volume of production at the plants located in the coverage region of Ribeirão Preto terminal (5,289,870 m³) and Uberaba terminal (1,901,825 m³) would have to increase by 76.5%, reaching a volume of 9,336,637 m³ of production in Ribeirão Preto and 3,356,720 m³ in Uberaba.

Based on its recent performance and considering that the growth rates will remain stable, this would occur in 8.5 years from now, since the production of the South-Central region increased 82.7% between 2006 and 2015, from 14.311 million m³ of ethanol in the 2005/2006 harvest to 26.146 million m³ in the 2014/2015 harvest (UNICA, 2015).

In this case, viability is associated to change the initial unimodal alternative to a multimodal operation, with the stretch to Uberaba and SELIC rate of 10.9% retained. The results from this projection are presented in Table 4.

It is noteworthy that the multimodal alternative presents technical and financial advantages when compared with the unimodal ones. The enterprise requires a lower production volume to achieve viability, when the multimodality is used. Considering the steady growth of production, it would be necessary a lower production volume to enables the project, which also means less time required to obtain this production. Therefore, the integration of operations creates more favorable conditions so that the project becomes viable, considering

the uncertainties that may exist regarding to the production increase over time.

4.4.2 Alternative sources of financing

The IRR of 5.15%, determined for the multimodal project (transferring + collection), considering the stretch to Uberaba, is an alternative that could become possible. Therefore, it would be necessary to hire resources in international markets to finance the project. The interest rates of some countries are considerably lower than the Brazilian one. For instance, the basic rates of the countries from the Group of Seven – G7, international group that gathers the 7th most industrialized and economically developed countries in the world. In descending order, the interest rate of Canada and the UK is 0.500%; that for the United States is 0.250%; for Germany, France and Italy is 0.050%; and for Japan is 0.000%. The values are from October and November, 2015 (Trading Economics, 2015).

Although this alternative source would equate the cost of capital with the internal rate of return; it would increase the currency risk of the project already presents in the revenues. It would happen because the production capacity and production level of the plants suffer interference of international prices, based on three aspects: 1) there is ethanol demand from other countries (EPE, 2014); 2) there is variation in the international price of substitute products (other fuels with the same use) (ANP, 2014a); and 3) there is production of concurrent products (e. g. sugar) (EPE, 2014).

Table 3. NPV and IRR analysis of collection and transferring operations of ethanol in the Central-South region of Brazil considering a production increase of 100%

| Closure terminal | Technical | Projects | | |
|------------------|-----------|---|--|---------------------------|
| | | Transferring (Pipeline construction and operation) | Collection (Acquisition and operation of vehicles fleets) | Transferring + collection |
| Uberaba | NPV | R\$ 1,597,644.17 | R\$ 81,991,730.41 | R\$ 187,201,632.06 |
| | IRR | 10.91% | 22.67% | 12.23% |

Table 4. NPV and IRR analysis of collection and transferring operations of ethanol in the Central-South region of Brazil considering production increase of 76.5%

| Closure terminal | Technical | Projects | | |
|------------------|-----------|--|---|---------------------------|
| | | Transferring (Construction and operation of pipeline) | Collection (Acquisition and operation of vehicle fleets) | Transferring + collection |
| Uberaba | VPL | -R\$ 161,518,712.09 | R\$ 72,069,424.39 | R\$ 1,624,235.42 |
| | TIR | 9.44% | 22.67% | 10.91% |

4.4.3 Integration of the transferring and collection operations

The integration of the transferring (pipeline project) and collection (road project) operations improves the outcome, compared to the initial proposal (only the transferring of ethanol). This happens due to the positive result of the collection operation decreases the loss related to the transferring operation. However, it is not enough to enable this alternative.

The assessment of the ethanol collection operation shows a positive NPV and an IRR higher than the discount rate (10.9%). However, the NPV is negative and the IRR is lower than the discount rate, whenever it is considered the transferring operation making the integration project non-feasible.

4.4.4 Reassessment of the useful life of the transport system

The project's feasibility has a low sensitivity to the reassessment of the useful life of assets. We have evaluated it considering the extended life of the Uberaba project's assets to 50, 75, 100 and 125 years. However, there was not enough positive impact on the forecasted results to balance investments and returns, despite the high values reached in NPV and IRR techniques for the extensions.

5. FINAL CONSIDERATIONS

The pipeline construction requires great investments, which coupled with the high Brazilian rate of interest, factors that become non-feasible the projects for transporting ethanol by pipeline.

The coverage regions of Uberaba and Ribeirão Preto, even in the crisis situation currently faced by the sugar and ethanol sector, still would have potential to provide ethanol in amounts to allow the pipelines terminals operate in their maximum capture capabilities. However, even working in these conditions, if the pipeline construction ends up in Uberaba, the pipeline project does not reach financial feasibility. It would be necessary to increase the production volume transported by pipeline in order to improve its viability. This increase can be reached either by expanding the capacity of Ribeirão Preto and Uberaba terminals, and increasing production in the coverage regions of these terminals; as constructing the remaining stretches of the pipeline.

Nevertheless, the road project presented financial viability. Although its integration to the pipeline project improves attractiveness of the unimodal project, it would not be enough to make the multimodal project viable. However, the comparison between the multimodal alternative and the pipeline unimodal alternative -in scenarios that attempted to make feasible the pipeline project by means the production increasing transported by pipeline and the extension of the duration of the project -showed that the occurrence of these two factors, added to the multimodality, have the potential to improve conditions to enable the pipeline project.

It is clear that the integration of the transferring and collection operations would require a smaller production volume, to make the venture viable. Similarly, the multimodality associated with the increase on useful life of assets would result in higher values for the NPV and IRR indexes, although it would not be enough to enable the venture.

A limitation of this paper is the estimate data of the ethanol production from plants / municipalities, since the real data was unavailable. In addition, we have not analyzed the risks associated to the multimodal and unimodal pipeline projects.

Therefore, we point out as suggests for future research, to review the assessment of ethanol transport modes in the South Central region considering more accurate production data and the production volume of plants located at distances greater than 200 km. We also recommend studies on the financial viability of the remaining stretches of the pipeline (to be built); the effect of aggregation of other modes of transport as additional service, such as waterways; and the risk of ethanol transportation projects.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was published with CNPq support, National Council for Scientific and Technological Development- Brazil (Research Productivity Fellowship Holder - CNPq Brazil Process 308729/2014-5).

REFERENCES

- ANDRIOLLI, M. (2009). *Analysis of economic and financial feasibility of pipelines in Brazil*. Luiz de Queiroz College of Agriculture. Master's dissertation. University of São Paulo [in Portuguese].
- ANP (2014a). *Annual prices bulletin*. National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels, Rio de Janeiro, RJ, Brazil. [Online] available from: <www.anp.gov.br/?dw=73131>. (accessed 20 dec, 2014) [in Portuguese].
- ANP (2014b). *Ethanol bulletin*. National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels, Brasília, DF, Brazil. [Online] available from: <<http://www.anp.gov.br>>. (accessed 08 nov, 2014) [in Portuguese].
- BARROS, C. C. C., & WANKE, P. F. (2012). *Ethanol distribution logistics: an evaluation proposal for the feasibility in building pipelines from the Midwest of Brazil*. Rural & Agribusiness organizations, 14(3), 343-355 [in Portuguese].
- BRASIL, H. G. (2002). *Modern evaluation of investment*. Qualitymark Press, Brazil [in Portuguese].
- BRESSAN FILHO, A. (2006). *Ethanol as a new universal fuel*. Analysis [in Portuguese].
- CONAB (2014). *Historical series of planted area, production and productivity of sugarcane*. National Supply Company, Brasília, DF, Brazil. [Online] available from: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1252&&Pagina_objcmsconteudos=2#A_objcm>

- sconteudos>; (accessed 20 nov, 2014) [in Portuguese].
- EPE (2014). *Sector Analysis of Biofuels in the Year 2013*. Energy Research Company, Brasília, DF, Brazil. [Online] available from:< <http://www.epe.gov.br/Petroleo/Documents/>>; (accessed 08 nov, 2014) [in Portuguese].
- FARINA, E., RODRIGUES, L., & SOUSA, E. L. (2013). *The oil policy and the ethanol industry in Brazil*. National Interest [in Portuguese].
- FLEURY, P. F. (2005). *Integrated planning of the logistics system of fuel distribution*. Brazilian Seminar of Fuel Distribution Logistics, 2005, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo (IBP) ["Brazilian Petroleum Institute"]. 1 CD [in Portuguese].
- GIL, A. C. (2002). *How to classify research*. In Gil A. C. How to prepare research projects, 4th edition. Atlas, São Paulo, 41-57 [in Portuguese].
- GITMAN, L. J., & MADURA, J. (2003). *Financial management: a commercial approach*. Pearson Education, São Paulo [in Portuguese].
- GONZAGA, M. J. V. (2015). *Financial feasibility of the integration of road and pipeline modes for ethanol transport*. Institute of Humanities and Social Sciences. Mastering Dissertation, Fluminense Federal University [in Portuguese].
- HAIR JR, J. F.; BABIN, B., MONEY, A. H., & SAMOUEL, P. (2005). *Fundamentals of research methods in management*. Bookman, Porto Alegre [in Portuguese].
- LIMA, N. C., OLIVEIRA, S. V. W. B., OLIVEIRA, M. M. B., & QUEIROZ, J. V. (2013). *Demand characterization of hydrated ethanol fuel in the Brazilian market*. Contemporary management, 13 [in Portuguese].
- NIEMEYER, L. (2009). *The production of ethanol and the environment: the economy political of cost-benefit analysis*. IESE, II Conference. Maputo [in Portuguese].
- POOTAKHAM, T., & KUMAR, A. (2010). *Bio-oil transport by pipeline: A techno-economic assessment*. Bioresource technology, 101(18), 7137-7143.
- RODRIGUES, S. B. M. (2007a). *Assessment of alternatives to transport ethanol for export from the South-Central region*. Doctoral thesis. University of São Paulo [in Portuguese].
- RODRIGUES, P. R. A. (2007b). *Introduction to Transportation Systems in Brazil and the International Logistics*, 4th edition. Aduaneiras, São Paulo [in Portuguese].
- SEAB (2014). *Sugar cane and sugar-alcohol sector*. Prognosis 2014-15. State secretary of Agriculture and Supply. Brasília, DF. [Online] available from:http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/cana_2014_15.pdf; (accessed 08 nov, 2014) [in Portuguese].
- TRADING ECONOMICS. (2015). *Indicators*. [Online] available from:<<http://pt.tradingeconomics.com/indicators>>. (accessed 24 nov, 2015).
- UNICA. (2014). *Brazilian sugar-energy sector is penalized by misguided public policies, not by lack of investment as says the president of Petrobras*. Union of Cane Sugar Industry. [Online] available from: <<http://www.unica.com.br/imprensa/>>. (accessed 08 nov, 2014) [In Portuguese].
- UNICA. (2015). *Unicidata*. Production. [Online] available from:<<http://www.unicadata.com.br>>. (accessed 24 nov, 2015) [in Portuguese].

- VALENTE, A. M., PASSAGLIA, E., NOVAES, A. G., & VIEIRA, H. (2008). *Transportation and fleet management*. Cengage Learning. São Paulo [in Portuguese].
- XIE, F., HUANG, Y., & EKSIIOGLU, S. (2014). *Integrating multimodal transport into cellulosic biofuel supply chain design under feedstock seasonality with a case study based on California*. *Bioresource technology*, 152, pp. 15-23.
- ZAP LOGÍSTICA. (2014). *Zap Frete Online*. [Online] available from: <www.zaplogistica.com.br/>. (accessed 20 Oc, 2014) [in Portuguese].

51 Plataforma geográfica para la gestión de información de características físicas y de operación de la red carretera federal

Ana Cecilia Cuevas Colunga

Jaime Guillermo Pérez Castro

Gerardo Ríos Quezada

Instituto Mexicano del Transporte, México

RESUMEN

En el ámbito de la gestión vial la información veraz y oportuna tiene un impacto en la toma de decisiones. La demanda de informes de carácter técnico en los cuales se correlacionen datos de siniestralidad con variables físicas y de operación de la red carretera obliga a crear mecanismos que faciliten su elaboración. En este trabajo se desarrolla una plataforma geográfica para la gestión de información de las características físicas y operativas de la red carretera que pretende reducir los tiempos de respuesta ante las diversas solicitudes de información. Para la nueva versión del sistema de información geográfica de accidentes fue necesario generar una base de datos de los tramos carreteros, definiendo para cada uno: nombre, cadenamiento inicial y final, jurisdicción de vigilancia por parte de la Policía Federal, número y tipo de carretera según la actualización de la NOM-012-SCT-2-2014, clave de carretera según el libro de datos viales que expide la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y datos de operación tales como: el tránsito diario promedio anual y la configuración vehicular.

Dentro de los resultados se encuentran: un mapa de clasificación de carreteras que contempla los cambios por la actualización de la citada norma, una herramienta para la gestión de la seguridad vial que permite la ubicación de sitios de alta siniestralidad en función del número de colisiones o la severidad, un perfil de siniestralidad por tipo de vehículo y tipo de colisiones, y generación de indicadores de seguridad.

Palabras clave: Carreteras, siniestralidad, SIG, tránsito.

1. INTRODUCCIÓN

El Instituto Mexicano del Transporte (IMT) desde hace 15 años realiza esfuerzos en la difusión de la condición que presenta la seguridad vial en la Red Carretera Federal (RCF) a través de la publicación de un anuario estadístico de accidentes (Cuevas et al., 2013a; Cuevas et al., 2013b; Cuevas et al., 2015; Cuevas et al., 2014). Este trabajo pretende evitar los esfuerzos aislados que realizan diversos organismos tanto públicos como privados, para recopilar y organizar información sobre la siniestralidad en dicha red. Se pretende que esta tarea continúe en coordinación con todos los organismos relacionados con la problemática

de la seguridad vial pudiendo así, compartir, confrontar y enriquecer la información generada. Debido a lo anterior, IMT (2003) desarrolló un sistema que permite administrar los datos de accidentes viales mediante una plataforma geográfica, no obstante que en aquel momento se carecía tanto de herramientas como de datos que permitieran un correcto aprovechamiento del sistema; por otra parte, con el paso del tiempo la RCF ha sufrido modificaciones, mismas que no fueron actualizadas en el sistema. Ante este panorama resultó inminente la creación de una plataforma que no solo refleje las condiciones de siniestralidad, sino que permita su correlación con otros datos de la vía y su operación.

2. CREACIÓN DE BASES DE DATOS

2.1 Catálogo de tramos

Para la nueva versión del sistema para la administración de datos de accidentes viales fue necesario en primera instancia, generar una base de datos de los tramos carreteros debido a que la red ha presentado modificaciones en sus carreteras libres y de cuota, además no se habían eliminado aquellos tramos que ya no se encuentran bajo la jurisdicción de la federación, tales como los que fueron entregados a los estados o municipios debido a que quedaron inmersos en las zonas urbanas y que en la mayoría de los casos ya no eran vigilados por la Policía Federal (PF). Como resultado de esta revisión y considerando la información consultada en SCT-DGST (2011), SCT-DGST (2012), SCT-DGST (2013), SCT-DGST (2014), PF (2015a) y PF (2015b) se generó un nuevo listado de aproximadamente, 1,900 tramos y la red carretera para el análisis se redujo de 57 a 49 mil km, de los cuales alrededor de 900 km, aunque son de jurisdicción federal, actualmente carecen de vigilancia por parte de la PF.

En el nuevo catálogo de tramos se definió para cada uno de éstos lo siguiente: nombre, cadenamamiento inicial y final, jurisdicción de vigilancia como se indica en PF (2015a) y clave de carretera según SCT-DGST (2014); siguiendo las reglas para la creación de bases de datos, cada tramo de este catálogo tendrá una clave única e irrepetible que lo identifique. Dicha clave se integra con el número de la entidad federativa, clave de carretera y número de tramo. Ahora bien, durante la generación del catálogo se identificaron algunos problemas: Inconsistencia en la continuidad del cadenamamiento, principalmente en la unión entre carreteras de cuota y libres, por ejemplo, la carretera León -Aguascalientes (libre) se une con la autopista León - Aguascalientes en el km 99+000, a partir de este punto el cadenamamiento que continúa es el de la autopista, es decir del km 104+000 al 108+000 que corresponde al límite entre los estados de Jalisco y Aguascalientes; una vez cruzados los límites, se retoma el cadenamamiento de la carretera libre con el km 103+300; de tal manera que en la carretera León -Aguascalientes (libre) no existe el tramo del km 99+000 al 103+300 y existen dos secciones de carretera diferentes que tienen el mismo kilometraje (del 104+000 al 108+000), véase Figura 1. Lo anterior causa confusión en la administración de la información ya que al registrarse una colisión en el km 105+000, es necesario verificar la estación de la PF (Lagos de Moreno o Aguascalientes) que hizo el reporte para poder ubicar el siniestro en la

carretera correspondiente. Para el catálogo de tramos, este problema se solucionó considerando que la autopista termina en el km 108+000 y que la carretera libre tiene una discontinuidad del km 99+000 al 103+300. Situaciones similares se presentan en la unión de otras carreteras tales como: Monterrey – Reynosa libre y cuota y Monterrey - Nuevo Laredo libre y cuota, esta última representa una situación más crítica dado que un cuerpo de la carretera conserva el cadenamiento de la carretera libre y el otro continúa con el cadenamiento de la autopista, de tal forma que en un mismo punto se tienen kilometrajes distintos.

- A su vez, se encontraron discontinuidades en el cadenamiento entre entidades federativas. Es un problema similar al anterior, pero en este caso la discontinuidad no obedece a la unión entre dos carreteras, por ejemplo, en la carretera Puebla – Belem, los límites de estado para Puebla están en el km 3+500 mientras que para Tlaxcala es el km 4+800.
- Inconsistencia en el número de ruta, es decir, se desconoce la ruta oficial dado que la información de SCT-SI (2014), SCT-DGST (2014) y PF (2015a) presenta diferente nomenclatura. Los documentos anteriormente citados indican un número de ruta distinto respecto al señalamiento existente en la carretera.
- Cadenamientos invertidos con respecto a la versión anterior del catálogo de tramos del IMT. Este es un problema que tiene su origen en la creación inicial del catálogo de tramos debido a la falta de información en su momento, pero que fue solventado durante el presente estudio.

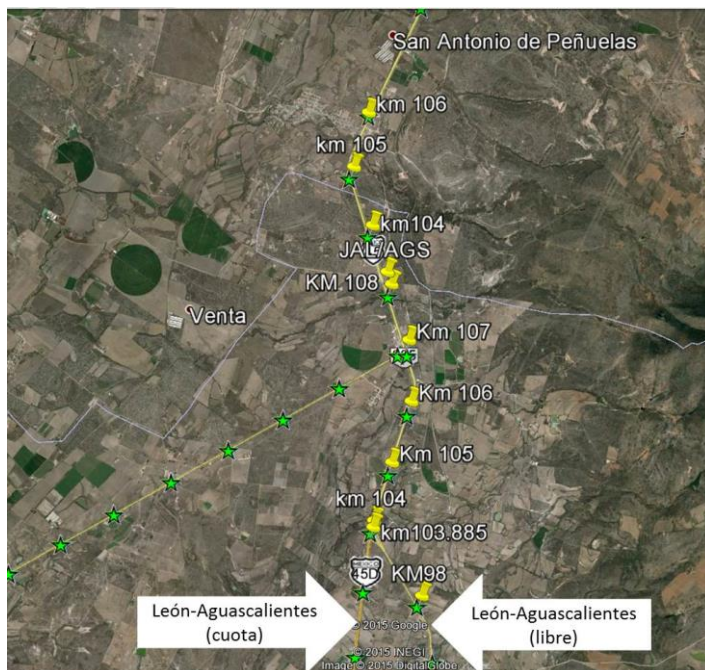


Figura 1. Discontinuidad del cadenamiento en la unión de la carretera León – Aguascalientes y la autopista del mismo nombre

- Ubicación de postes de cadenamamiento desfasados, lo que genera una diferencia entre la longitud que indica el señalamiento y la real. En esta situación se encuentra la carretera Hermosillo - Yécora en la Figura 2 se observa que después del poste de kilometraje 224 está el poste del km 235, aunque la distancia entre ellos no supera los 1,500 m; no se trata de un error puntual en la colocación de un poste de kilometraje ya que posteriormente se encuentra el poste del km 237, sino que obedece a un problema sistemático en la colocación del señalamiento informativo de identificación.
- La longitud de los tramos en el catálogo anterior era muy variable, por ello se optó por establecer segmentos más uniformes, aproximadamente entre 20 y 40 km. Esta medida surge ya que en la versión anterior existían tramos de hasta 220 km de longitud y al jerarquizarlos por el valor absoluto de colisiones, éstos resultaban en los primeros lugares; por otra parte, en el análisis de los indicadores que están en función de la longitud como los siniestros por kilómetro, los tramos de muy corta longitud resultaban ser los más riesgosos. La propuesta en la definición de tramos atiende las siguientes consideraciones: i) los límites de jurisdicción de vigilancia expuestos en PF (2015a), ii) se respetó de manera estricta la jurisdicción federal de los límites estatales establecidos en SCT-DGST (2014); iii) los cambios en el tipo de sección respecto al número de carriles. Por lo anterior, algunos tramos siguen permaneciendo con una longitud inferior a 5 km, representando el 7% de los tramos, mientras que, en la versión anterior, estos representaban el 18%.
- Tramos carreteros cuyo mantenimiento y vigilancia han pasado a cargo del estado o municipio (principalmente zonas urbanas). Todos los segmentos con esta característica fueron eliminados del catálogo.
- Tramos carreteros federales que no se encuentran vigilados por la PF. En esta situación se identificaron 893.76 km de la RCF y de los cuales el 36% corresponde a tramos que anteriormente se encontraban bajo la vigilancia de las estaciones de Zitácuaro y Huetamo en el estado de Michoacán.

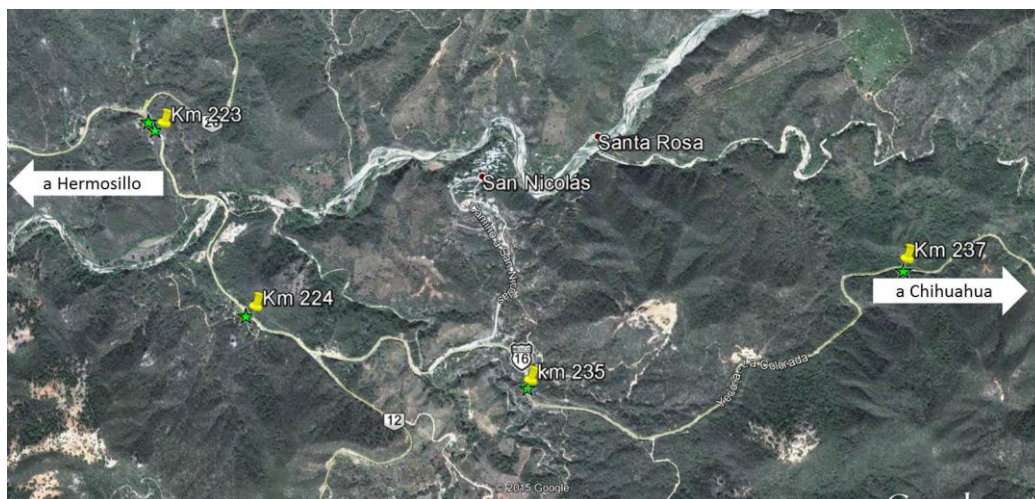


Figura 2. Desfase de señalamiento informativo de identificación en la carretera Hermosillo – Yécora

- Existen tramos de carretera que en su paso por poblaciones dejan de ser de jurisdicción federal y no son vigilados por la PF, sin embargo se mantuvieron dentro del catálogo y fueron identificados con una clave especial. Dichos tramos se conservaron para dar continuidad a la red y facilitar algunos análisis especiales.
- Respecto a la información proporcionada por la PF se identificaron algunos casos donde no se hace distinción en el nombre de un tramo carretero de cuota y uno libre, tal es el caso de la estación de Celaya que no hace distinción entre los nombres de los tramos de las carreteras libre y de cuota Querétaro - Irapuato.

El esfuerzo realizado en la revisión constituyó un producto que sirve de base para la elaboración de otros proyectos como lo son: el anuario estadístico de accidentes y el cálculo de costos de operación. Vincular diferentes fuentes de información en una base de datos es un ejercicio que exige tiempo y que sin el apoyo de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y de la PF no hubiese sido posible, ya que ambas entidades facilitaron datos sobre su jurisdicción en la RCF.

2.2 Bases de datos de accidentes

La base de datos para la Plataforma Geográfica parte de Cuevas et al. (2013a), Cuevas et al. (2013b), Cuevas et al. (2015), Cuevas et al. (2014), al ser conjuntados y homologados surge una base de datos con un total de 98,183 registros. Durante esta fase de la investigación fue necesario revisar las claves de las carreteras asignadas a los registros de accidentes, de tal forma que fueran solventados los cambios realizados en el catálogo de tramos. La Tabla 1 muestra los saldos de accidentes por año.

2.3 Datos de operación

Finalmente, a cada uno de los registros que integran el catálogo de tramos se les incluyó el número y tipo de carretera según DOF (2014) que regula el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal, así como el Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y la configuración vehicular (SCT-DGST, 2011; SCT-DGST, 2012; SCT-DGST, 2013; SCT-DGST, 2014). Esto con el fin de generar indicadores por rangos de tránsito y por tipo de carretera.

Tabla 1. Saldos de accidentes por año

| Año | N° de accidentes | N° de accidentes con víctimas | N° de muertos | N° de lesionados | Daños Totales (MXN) |
|--------------|-------------------------|--------------------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| 2010 | 27,241 | 14,400 | 4,822 | 27,929 | 1,442,206,656 |
| 2011 | 24,855 | 13,199 | 4,376 | 25,636 | 1,359,895,279 |
| 2012 | 24,085 | 12,860 | 4,548 | 24,364 | 1,379,634,362 |
| 2013 | 22,002 | 11,301 | 3,688 | 20,577 | 1,330,573,050 |
| Total | 98,183 | 51,760 | 17,434 | 98,506 | 5,512,309,347 |

3. PLATAFORMA GEOGRÁFICA

El siguiente paso fue ubicar geográficamente cada uno de los tramos. Para ello se utilizó la información vectorial de INEGI (2015) que contiene vectores que definen las calles locales, avenidas, caminos municipales, carreteras estatales y carreteras federales libres y de cuota. El proceso implicó: i) identificar el tramo en el archivo vectorial de la Red Nacional de Caminos (RNC), para ello fue necesario fusionar varios vectores pues la información que presenta la RNC atiende a una administración distinta a la que se requiere para constituir la Plataforma Geográfica; ii) una vez realizada la unión se revisó que la extensión y dirección del vector resultante correspondiera con la longitud del tramo y el sentido del cadenamiento de la carretera; iii) a cada tramo se le asignó el identificador del tramo, mencionado anteriormente, y que sirvió de vínculo con las bases de datos. La Figura 3 muestra la carretera Monclova – San Pedro de las Colonias con la clave 05062 y se encuentra en el estado de Coahuila con una longitud de 258 km, esta carretera fue segmentada en siete tramos; la versión anterior del catálogo la dividía en tres tramos y uno de éstos presentaba una longitud de 187 km. Esta actividad se realizó con la ayuda del “software” ArcGIS versión 10.

Esta capa de tramos sirvió como base para la generación de otras capas, en primer lugar, se realizó el proceso de segmentación dinámica donde cada tramo fue dividido en segmentos de 500 m, de tal forma que de los 1,914 tramos se generaron 98,950 segmentos; lo anterior generó una base de datos que cuenta con las mismas características del catálogo de tramos respecto a la información asignada a cada segmento, en la que se identifica cada vector con una clave única e irrepetible. La Figura 4 muestra un acercamiento del tramo Puerto de Ventanillas - San Pedro de las Colonias de 38 km de longitud, con el identificador de tramo 50506207 y que este a su vez sirve de raíz para formar los identificadores de segmento de 500 m.

A partir de los vectores de 500 m se elaboró una capa para representar las carreteras por jurisdicción de vigilancia es decir, por estación de la PF. Este proceso demandó crear un campo que conjuntara la clave de carretera de cinco dígitos y la clave de estación de la PF de cuatro dígitos, como resultado se obtuvo una capa con 964 vectores con su respectiva base de datos a la cual es posible incorporar información de siniestralidad y de operación.

La Figura 5 muestra a manera de ejemplo la RCF del estado de Nuevo León clasificada por estación de vigilancia de la PF, por ejemplo en color morado aparecen las carreteras vigiladas por Linares, que son: i) Ciudad Victoria – Monterrey del km 126+200 (límite de estados) al 223+500 (Allende); ii) Linares – San Roberto del km 0+700 (Linares) al 64+200 (Galeana) y iii) Montemorelos – China del km 2+400 (Montemorelos) al 45+400 (Las Tórtolas). En color amarillo, azul, verde y rojo se representan los tramos carreteros vigilados por las estaciones de Monterrey, Escobedo, San Roberto y Aeropuerto de Monterrey, respectivamente.

Los saldos de las colisiones acontecidas de 2010 a 2013 para las estaciones de la PF mostradas en la figura anterior se desglosan en la Tabla 2 y la Figura 6 muestra los índices por cada 100 millones de vehículos-km.

Analizando los saldos absolutos de siniestralidad destacan las carreteras vigiladas por la estación de Escobedo con un total de 1,391 colisiones en los cuatros años analizados, seguida por Monterrey; sin embargo, considerando el efecto de la movilidad, los indicadores de la Figura 6 señalan que las estaciones de San Roberto y Linares tienen a su cargo carreteras con mayor probabilidad de siniestros, superando el valor de los indicadores reportados en el estado los cuales fueron de 15.07, 2.26 y 14.24 para accidentalidad, mortalidad y morbilidad, respectivamente.



Figura 3. Formación de tramos de la Red Carretera Federal

Fuente: A partir de INEGI, 2015

Tabla 2. Saldos de colisiones de 2010 a 2013 para las estaciones de la Policía Federal que vigilan la Red Carretera Federal del estado de Nuevo León

| Datos de la estación de la PF | | Saldos de siniestralidad | | |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|---------------|------------------|
| Clave | Nombre | N° de colisiones | N° de muertos | N° de lesionados |
| 1901 | Aeropuerto de Monterrey | 15 | 1 | 15 |
| 1902 | Escobedo | 1,391 | 226 | 1,334 |
| 1903 | Linares | 341 | 59 | 381 |
| 1904 | Monterrey | 925 | 122 | 776 |
| 1905 | San Roberto | 714 | 128 | 602 |
| TOTAL | | 3,386 | 536 | 3,108 |

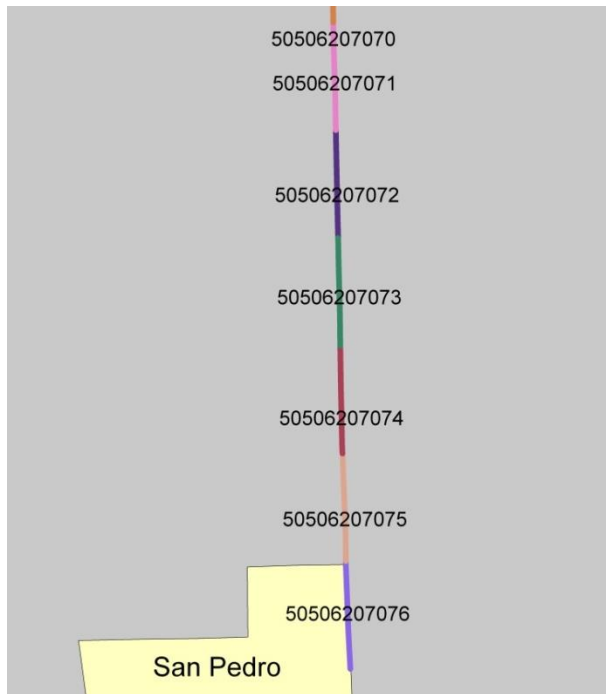


Figura 4. Capa de segmentos de 500 m, detalle del tramo 50506207 “Puerto de Ventanillas - San Pedro de las Colonias” de la carretera Monclova – San Pedro de las Colonias

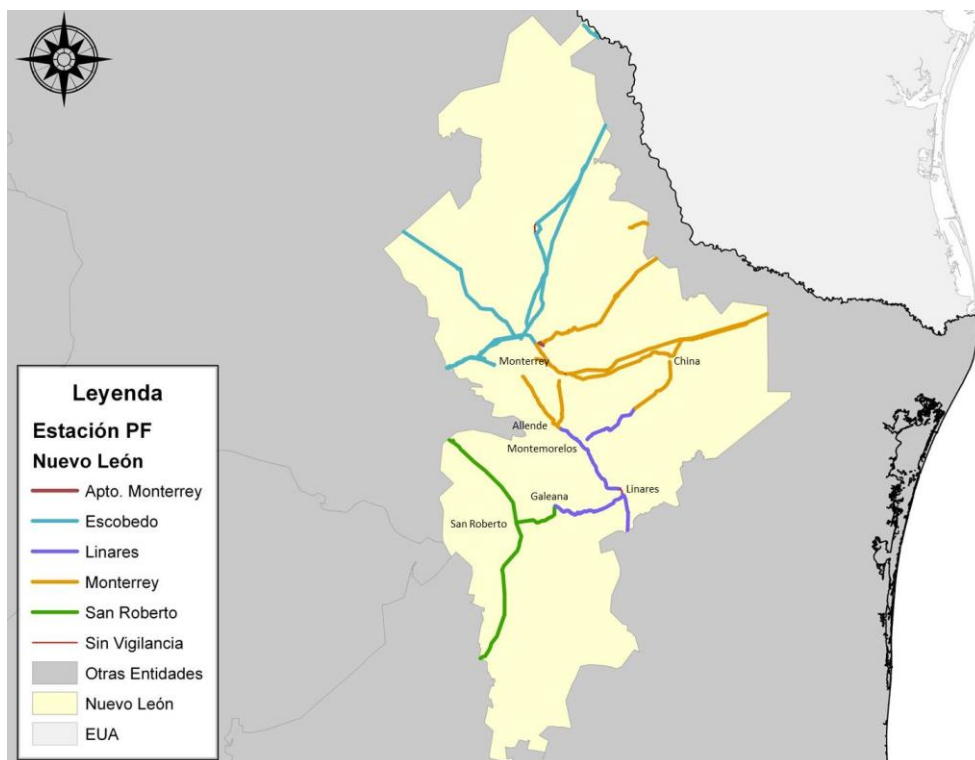


Figura 5. Red Carretera Federal del estado de Nuevo León representada por las estaciones de la Policía Federal a cargo de la vigilancia

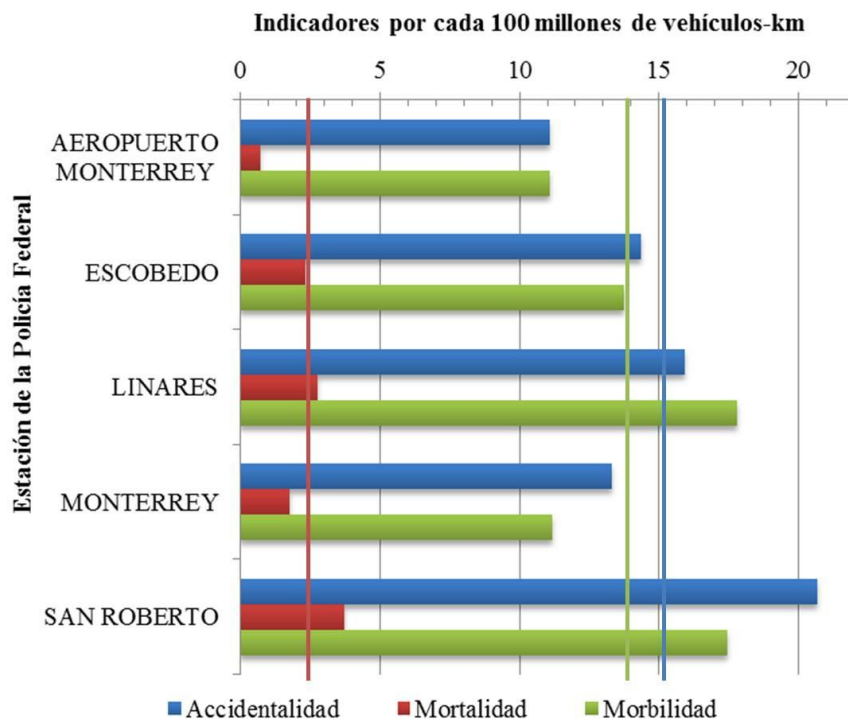


Figura 6. Índices por cada 100 millones de vehículos-km para las estaciones de la Policía Federal, para el periodo de 2010 a 2013

Agrupando los tramos que pertenecen a una misma carretera y con la herramienta de rutas se generó la capa de carreteras. A este nivel de agregación de datos es posible generar diversos indicadores que reflejan las características de siniestralidad y de operación bajo una perspectiva más amplia; en este sentido es importante, al momento de realizar un análisis, considerar que se deben comparar carreteras de características similares en función del volumen vehicular y número de carriles. La Figura 7 muestra la capa de carreteras donde la simbología está en función del número total de colisiones registradas durante los cuatro años analizados; las carreteras en color rojo son aquellas que registraron más de un millar de eventos, de este grupo sobresalen las autopistas México – Querétaro y Puebla – Córdoba con 2,109 y 1,898 siniestros, respectivamente y las carreteras Querétaro – San Luis Potosí y Coatzacoalcos – Villahermosa con 1,829 y 1,580 eventos cada una.

Otra fuente de información que quedó plasmada en la plataforma geográfica es la clasificación de las carreteras según se indica en DOF (2014). Para la generación de esta capa se utilizó como base la capa de segmentos de 500 m, la cual tiene asignada el número y la clasificación según la nueva versión de la norma citada, además se adicionó la clasificación mostrada en DOF (2008), con el objetivo de identificar los cambios realizados.

La Figura 8 muestra una comparación entre las longitudes de la red clasificadas según DOF (2008) y DOF (2014). A partir de lo establecido en DOF (2008) se observa que 16,317 km eran caminos tipo ET y A, es decir caminos que permiten la circulación de vehículos con el máximo peso y longitud autorizados. Empleando a DOF (2014) estos caminos sumaron

19,562 km; además se redujo la longitud de los caminos tipo B y se incrementó la longitud de los tipos C y D. Otro aspecto relevante que los autores del presente documento han externado a las autoridades, radica en los caminos sin clasificación, éstos forman parte de una laguna dentro de la ley, que no regula con exactitud el tipo de vehículo que puede circular por dichos caminos por consecuencia, no es posible clasificarlos en ninguna de las categorías anteriormente expuestas.

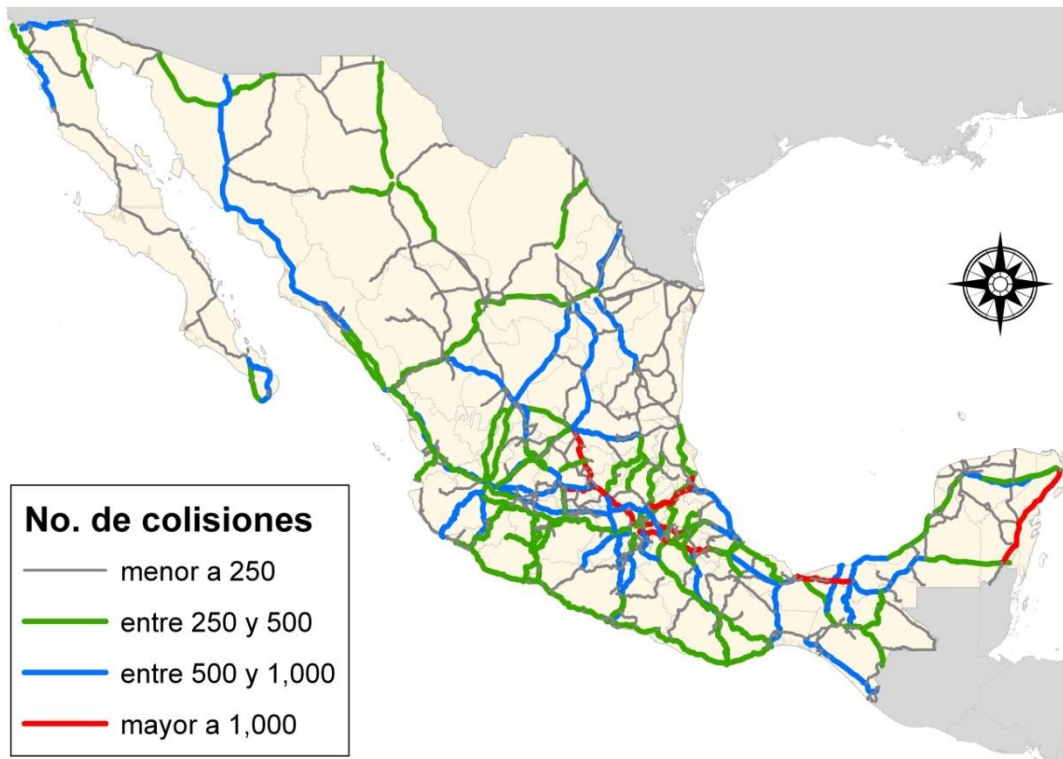


Figura 7. Número total de colisiones acontecidas de 2010 a 2013 por carretera

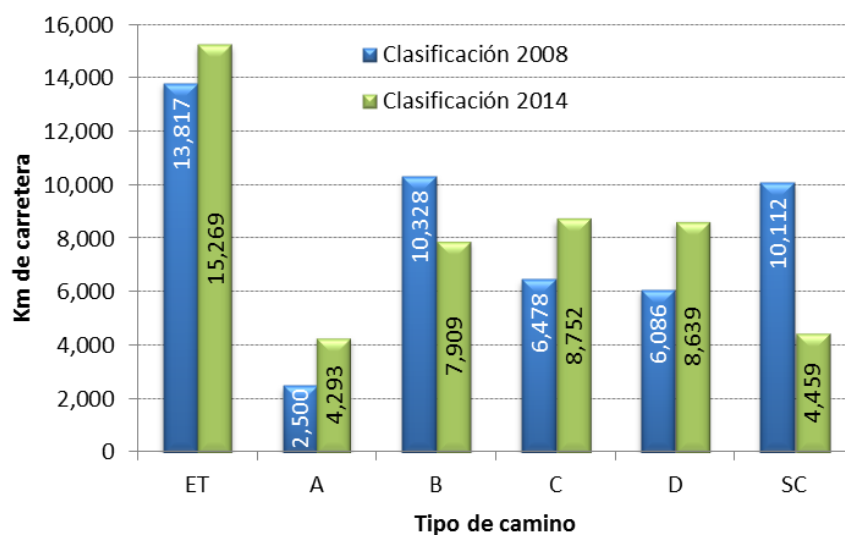


Figura 8. Comparación entre DOF (2008) y DOF (2014) respecto a longitudes según el tipo de carretera

Los caminos sin clasificación considerando a DOF (2008) agrupaban una longitud mayor a 10 mil km mientras que al utilizar a DOF (2014) el 20.3% de éstos fueron definidos como ET y A (autopistas o caminos directos que no estaban contemplados en la norma), el 3.2 y 3% como tipo B y C, respectivamente y en la categoría de caminos tipo D quedó el 34.9%, quedando sin clasificar 4,011 km.

Otro aspecto importante producto de la revisión de la Normativa son los cambios de clasificación, por ejemplo: i) de los caminos clasificados como ET el 93.3% conservó su categoría y en el 4.6% se redujo su clasificación (0.8% a tipo B y 3.8% a tipo C); ii) mientras que de los caminos tipo A el 69.5% conservó su clasificación, el 25.2% se redujo a C y el 5.3% a D; iii) respecto a los caminos tipo B, el 63.8% conservó su condición, el 18.3% subió a tipo ET/A y el 16.9% se redujo a tipo C. Lo expuesto con anterioridad es la explicación para el incremento en la longitud de los caminos tipo C y D derivados de DOF (2014) con respecto a DOF (2008); es decir, de los 2,894 km que pertenecían al tipo ET, A y B para DOF (2008), en DOF (2014) fueron clasificados como tipo C.

Una línea de investigación que se abre a partir de la reclasificación es el seguimiento a las cifras de siniestralidad de las carreteras que sufrieron un cambio en la clasificación, ya que para las carreteras que hoy presentan una restricción se esperaría una reducción de los siniestros puesto que la interacción con vehículos pesados en caminos con restricciones geométricas ya no existiría; por otra parte, las carreteras que incrementaron su clasificación no debieran experimentar cambios drásticos en la siniestralidad, a menos que sus características geométricas no cumplan con los requerimientos de la categoría a la que fueron asignadas; no obstante, se puede esperar un incremento en los siniestros debido al crecimiento del flujo vehicular.

La Figura 9 muestra a manera de ejemplo la red carretera del estado de Querétaro y sus alrededores con la clasificación de la carretera y el número según DOF (2014), las carreteras con el numeral 9999 forman parte de los 4,011 km que carecen de clasificación.

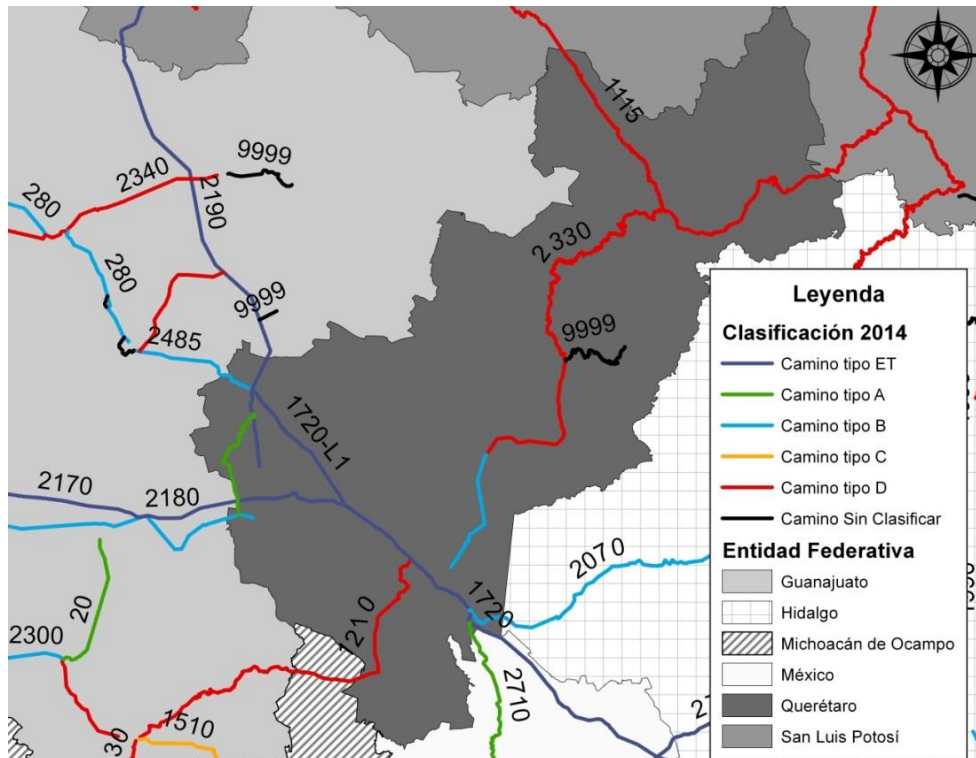


Figura 9. Clasificación de la RCF del estado de Querétaro

4. PUNTOS DE REFLEXIÓN Y RECOMENDACIONES

Llevar a cabo este ejercicio requirió un tiempo importante tanto para la creación de las bases de datos como de la plataforma geográfica. Si bien la versión de (IMT, 2003) presenta un sistema de identificadores que parte de las claves asignadas por la SCT a la RCF, éste fue mejorado en especial para las carreteras a las cuales aún no se les ha asignado una clave; en este aspecto es importante que todas las dependencias de la SCT utilicen el mismo sistema de identificadores, ya que durante la creación de la base de datos fue necesario consultar y cotejar varias fuentes de información (SCT-DGST, 2011; SCT-DGST, 2012; SCT-DGST, 2013; SCT-DGST, 2014; SCT-SI, 2014; PF, 2015a; PF, 2015b) en las que se observó que la identificación de los tramos carreteros es diferente.

Se identificaron algunas inconsistencias respecto a la vigilancia, los postes kilométricos de las carreteras y la continuidad del cadenamamiento, entre otras; todas se encuentran documentadas y en cuanto sea posible se harán llegar a las autoridades correspondientes.

Del presente trabajo se desprenden algunas líneas de investigación como son: i) el seguimiento de la siniestralidad de las carreteras que fueron reclasificadas, ii) la definición y evolución de indicadores en consenso entre los diversos actores, que permitan la evaluación de los tramos carreteros iii) la definición de los mecanismos y el procedimiento para la actualización constante de la plataforma geográfica, así como su migración a un “software” libre que permita la realización de consultas dinámicas. Se reconoce que aún quedan muchas variables que pueden ser integradas a la plataforma tales como: nivel de

servicio, velocidades de operación y calidad de la superficie de rodamiento; no obstante este ejercicio es un buen comienzo y se espera que en el corto plazo se puedan cubrir estas áreas.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con fondos de la Red Temática de Investigación de Accidentes Viales (número 253411), como parte del programa de Redes Temáticas 2015 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

REFERENCIAS

- CUEVAS, C., GÓMEZ, N., VILLEGAS, N., MAYORAL, E. Y MENDOZA, A. (2013a). *Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales 2010*. Documento Técnico No. 51, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México
- CUEVAS, C., GÓMEZ, N., VILLEGAS, N., MAYORAL, E. Y MENDOZA, A. (2013b). *Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales 2011*. Documento Técnico No. 56, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México
- CUEVAS, C., PÉREZ, G., MAYORAL, E. Y MENDOZA, A. (2015). *Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales 2013*. Documento Técnico No. 61, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México
- CUEVAS, C., VILLEGAS, N., MAYORAL, E. Y MENDOZA, A. (2014). *Anuario Estadístico de Accidentes en Carreteras Federales 2012*. Documento Técnico No. 57, Instituto Mexicano del Transporte, Querétaro, México
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, DOF. (2014). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2014, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. México
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, DOF. (2008). *Norma Oficial Mexicana NOM-012-SCT-2-2008, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal*. México
- INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE, IMT. (2003). *SIGA, Sistema de información geográfica de accidentes 2003*. México
- INSITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. (2015). *Red Nacional de Caminos 2015*. México
- POLICÍA FEDERAL, PF. (2015a). *Listado de tramos por jurisdicción de estaciones de la Policía Federal*. México
- POLICÍA FEDERAL, PF. (2015b). *Base de datos de los accidentes ocurridos en 2013, 2012, 2011 y 2010 en la Red Carretera Federal*. México
- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, DIRECCIÓN GENERAL DE SERVICIOS TÉCNICOS, SCT-DGST. (2011). *Datos viales 2010*. México.
- SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, DIRECCIÓN GENERAL

DE SERVICIOS TÉCNICOS, SCT-DGST. (2012). *Datos viales 2011*. México.
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, DIRECCIÓN GENERAL
DE SERVICIOS TÉCNICOS, SCT-DGST. (2013). *Datos viales 2012*. México.
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, DIRECCIÓN GENERAL
DE SERVICIOS TÉCNICOS, SCT-DGST. (2014). *Datos viales 2013*. México.
SECRETARIA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SUBSECRETARÍA DE
INFRAESTRUCTURA, SCT-SI. (2014). *Jurisdicción de las residencias de conservación
en carreteras federales por entidad federativa*. México.

52 Parámetros físicos asociados con la fricción en el diseño geométrico de vías

Luis Alberto Sánchez Muñoz

John Jairo Posada Henao

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

RESUMEN

El coeficiente de fricción es un factor determinante de la seguridad vial, principalmente cuando en la superficie del pavimento se presentan contaminantes como agua, aceites, etc. Es posible cuantificar mediante ecuaciones de diseño como el coeficiente de fricción o la tasa de desaceleración, el impacto ocasionado por contaminantes en el pavimento húmedo.

Conforme con lo analizado por autores como Sánchez (2015) y NCHRP (2009) entre otros, algunos de los parámetros de diseño asociados con la adherencia que tienen esta afectación son: la distancia de visibilidad de parada, cruce, adelantamiento y el radio de curvatura; todos, presentan el impacto de la fricción longitudinal y/o transversal.

El objetivo de la presente investigación se centra en analizar el impacto que tiene la variación de parámetros físicos, como la aceleración, en los parámetros de diseño mencionados anteriormente, en función de la magnitud del coeficiente de fricción del pavimento; también se concentra en formular observaciones para el mejoramiento de los parámetros utilizados y detectar puntos críticos dentro del diseño.

La metodología de esta investigación se divide en: i) revisión bibliográfica de aspectos clave, ii) estudio de la interacción automóvil - pavimento – agua, iii) análisis de las ecuaciones de diseño y iv) propuesta de mejora al actual diseño geométrico de vías.

El análisis de los factores que interactúan con la fricción devela cambios significativos en los resultados de las ecuaciones de diseño que impactan el rendimiento de los recursos en la construcción, la seguridad y el diseño geométrico de las vías.

Palabras clave: Fricción, pavimentos, diseño, vías.

1. PARÁMETROS FÍSICOS ASOCIADOS A LA FRICCIÓN

En Posada et al. (2014) se habla del coeficiente de fricción cinética partiendo de la segunda ley de Newton, el mismo concepto trabajado por Fwa & Ong (2008) pero en términos de aceleraciones así:

$$F_k = \mu_k * N \quad (1)$$

$$m * a = \mu_k * m * g \quad (2)$$

$$a = \mu_k * g \quad (3)$$

Dónde: a es el coeficiente de desaceleración por fricción en $[m/s^2]$, μ_k es el coeficiente de fricción cinética [adimensional], N es la fuerza normal sobre el vehículo $[Kg * m/s^2]$, m es la masa del vehículo de diseño $[Kg]$ y g es la gravedad $[m/s^2]$.

Para hablar de fricción en un vehículo debe hablarse de la fuerza que ejerce tangencialmente éste respecto a la fuerza normal que la superficie de rodadura ejerce sobre él, más específicamente, se habla de la razón entre la aceleración que el vehículo experimenta y la gravedad, alterando el valor de la gravedad con el coeficiente de fricción.

Este concepto se desarrolla cuando el sistema ha entrado en movimiento, por ende dicho coeficiente de fricción es menor al coeficiente estático.

En la investigación presentada en Ju et al. (2013) la tasa de desaceleración longitudinal del vehículo, presentada en Posada et al. (2014) está dada por:

$$a(t) = [\mu_k + G] * g \quad (4)$$

Dónde: $a(t)$ es la tasa de desaceleración del vehículo en $[m/s^2]$, μ_k es el coeficiente de fricción cinética [adimensional], G es la pendiente [adimensional] y g es la aceleración de la gravedad en $[m/s^2]$

El concepto anterior puede asociarse también al concepto de número de resistencia al deslizamiento, según Fwa & Ong (2008) la resistencia al deslizamiento se cuantifica mediante la siguiente expresión:

$$SN = \frac{F_x}{F_z} * 100 \quad (5)$$

Dónde: SN es la resistencia al deslizamiento (“skid number”) en [%], F_x es la fuerza longitudinal $[KN]$ y F_z es la carga que actúa sobre el eje del neumático que también es igual a la suma de la fuerza de contacto normal más las fuerzas de levantamiento del fluido $[KN]$.

Partiendo de la información presentada en Ju et al. (2013) puede decirse que el coeficiente de fricción del pavimento está directamente relacionado con el SN así:

$$\mu_k = 0.01 * SN \quad (6)$$

Dónde: μ_k es el coeficiente de fricción cinética [adimensional] y SN es la resistencia al deslizamiento (“Skid Number”) [%]

A continuación, se muestran algunos valores típicos para SN de acuerdo a Fwa & Ong (2008) donde se presentan las características generales de diversos ensayos y los valores para SN.

1.1 Resistencia a la rodadura

Cuando no hay una fuerza de resistencia al movimiento de las llantas se debe a la deflexión natural y característica de un neumático al rodar, la Figura 1 muestra las fuerzas que actúan sobre una llanta, el vehículo anfitrión tira a una velocidad constante con fuerza F_X . La carga normal en la rueda de medición es F_W .

Una pequeña fuerza longitudinal de deslizamiento del neumático en la huella soporta la deflexión, como resultado, la distribución normal de la presión se vuelve irregular, de tal manera que la fuerza normal resultante (centro de presión) desde el suelo, F_G , crea un momento de resistencia.

El momento de resistencia a la rodadura, $F_G * a$, debe oponerse con un momento, $F_R * r$, aplicado sobre el eje de la rueda, sólo si la rueda mantiene una rotación constante y la velocidad de desplazamiento típico de los dispositivos de medición es continua, la rueda de la figura puede producir este momento opuesto por obra del deslizamiento de las llantas en la zona de contacto cuando se tiene en cuenta la resistencia generada entre la rueda y la superficie, la superficie está reaccionando con la fuerza F_R (NCHRP, 2009).

La suma de momentos es como sigue:

$$F_G * a - F_R * r = 0 \quad (7)$$

En este escenario $F_G = F_W$, y por lo tanto se puede escribir como:

$$F_R = \frac{a}{r} * F_W \quad (8)$$

un coeficiente de fricción se puede definir como sigue:

$$\mu_R = \frac{F_R}{F_W} = \frac{\frac{a}{r} * F_W}{F_{W0}} = \frac{a}{r} \quad (9)$$

Para superficies horizontales secas y rígidas, la resistencia a la rodadura está en el rango de 0.5 a 3 por ciento del peso transportado (NCHRP, 2009).

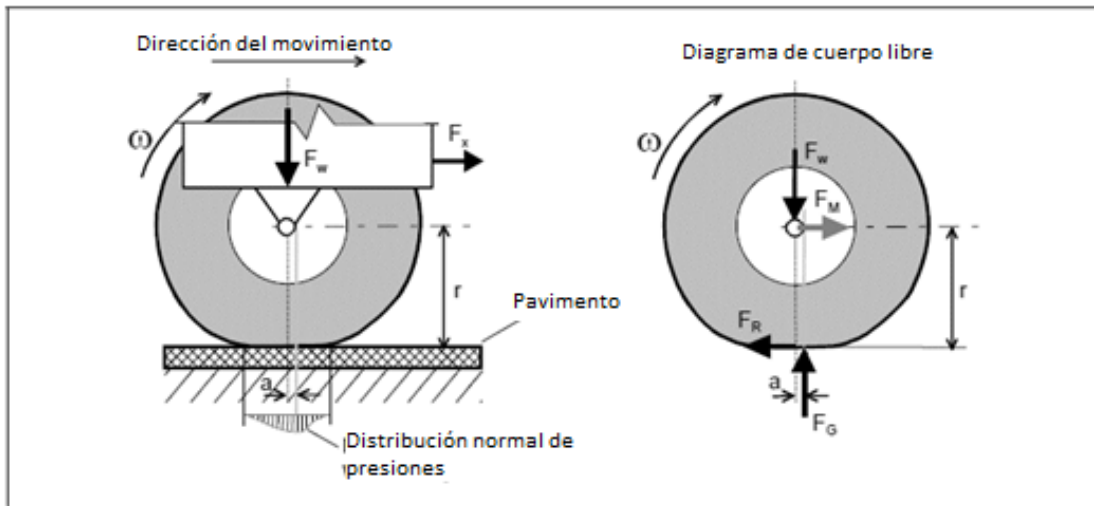


Figura 1. Resistencia al deslizamiento en velocidad constante

Fuente: NCHRP, 2009

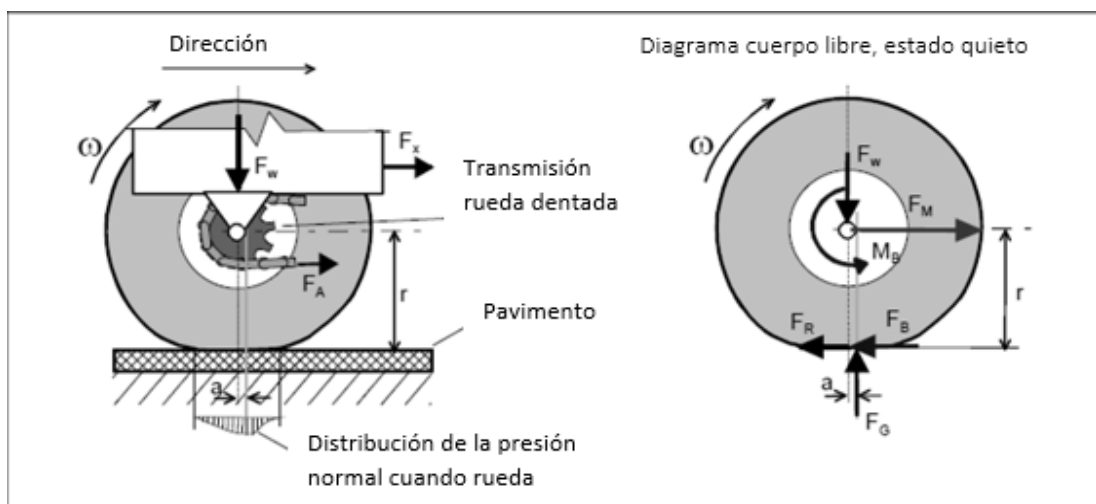


Figura 2. Fuerzas y momentos en frenado constante en superficie limpia

Fuente: NCHRP, 2009

1.2 Fuerza de frenado aplicada

Para medir la fricción de frenado, un dispositivo debe aplicar un momento. Un escenario con el frenado se representa en la Figura 2, tomada de NCHRP (2009). Una fuerza de frenado aplicada de deslizamiento constante, F_B , trabaja opuesta a la rotación de la rueda. El momento de frenado aplicado, M_B , es el producto de la fuerza aplicada y el radio de la rueda, la resistencia (F_R y F_M) está siempre presente cuando la rueda está girando (NCHRP, 2009).

Un momento de frenado hace que la rotación de la rueda disminuya para frenar y crea una fuerza de resistencia al deslizamiento, F_B , en la zona de contacto entre la llanta y la superficie.

Los momentos alrededor del eje de la rueda en equilibrio en estado estacionario son:

$$M_B - F_B * r - F_R * r + F_G * a = 0 \quad (10)$$

Un dispositivo de fricción par de medición medirá el par medio, T_M , que es igual al momento de frenado aplicado, M_B . Resolviendo la ecuación anterior para M_B o T_M queda así:

$$T_M = F_B * r + F_R * r - F_G * a \quad (11)$$

Ahora, si se supone que la deformación de la llanta durante el frenado tiene la misma relación básica para la resistencia como para el caso libre, y F_G actúa verticalmente, entonces $F_R * r$ es igual a $F_G * a$ y el par medido es como sigue:

$$T_M = F_B * r \quad (12)$$

Por la suma de las fuerzas horizontales en estado estacionario:

$$F_M - F_B - F_R = 0 \quad (13)$$

Resolviendo para F_R en la ecuación anterior y sustituyendo para F_B se tiene:

$$F_R = F_M - \frac{T_M}{r} \quad (14)$$

Este escenario es válido para las mediciones de fricción de las superficies limpias, secas y rígidas.

1.3 Fuerza de fricción con contaminantes

Un automóvil circula sobre el agua cuando el material contaminante (fluido) queda atrapado bajo la rodadura de las llantas en cantidades suficientes y a una velocidad de desplazamiento suficientemente alta como para separar una parte o la totalidad de la banda de rodadura de la superficie base (NCHRP, 2009).

El contaminante queda atrapado porque no hay tiempo suficiente para que fluya fuera del área de la huella, además la superficie y la banda de rodadura no tienen ranuras o huecos suficientes para permitir que el líquido se introduzca en esos espacios y por lo tanto, pueda escapar fácilmente del área de la huella (NCHRP, 2009).

A medida que el fluido queda atrapado, entra en el borde delantero de la zona de contacto entre la llanta y la superficie, se da lugar una fuerza de elevación de fluido que actúa para separar la llanta de la superficie de la base (NCHRP, 2009).

En la Figura 3 se presenta una superficie de rodadura sin freno aplicado, allí hay dos fuerzas, F_G y F_L , que llevan la carga normal F_W ; F_G es la fuerza de reacción del suelo desde la superficie de base todavía en contacto con la llanta, F_L es la fuerza que imprime el líquido, como resultado de este cambio en la ubicación de F_G , la fuerza de resistencia de rodadura, F_R , actúa en sentido contrario en la Figura 3. La fuerza de sustentación del fluido tiene un eje a una distancia b del centro de la llanta, también se observa la fuerza de resistencia del fluido horizontal (F_{LG}) actuando en la superficie de la llanta sobre el área de contacto. La suma de F_R y F_{LG} constituye la resistencia a la rodadura (NCHRP, 2009).

La fuerza de reacción restante, F_G , tiene su eje antes y después de la posición del eje de la llanta, la suma de las fuerzas de reacción de la superficie es igual al peso estático llevado por la rueda.

$$F_W = F_G + F_L \quad (15)$$

La fuerza de elevación del líquido, F_L , cuenta con una fuerza de reacción, F_{LG} , en la superficie de contacto entre la llanta y el suelo, al tomar el momento alrededor del eje de la rueda.

$$F_L * b = F_{LG} * r \quad (16)$$

Reordenando la ecuación anterior, la fuerza de reacción del fluido horizontal es el siguiente:

$$F_{LG} = \frac{b}{r} * F_L \quad (17)$$

La suma de las fuerzas horizontales en equilibrio es:

$$F_M + F_R + F_{DG} - F_D - F_{LG} = 0 \quad (18)$$

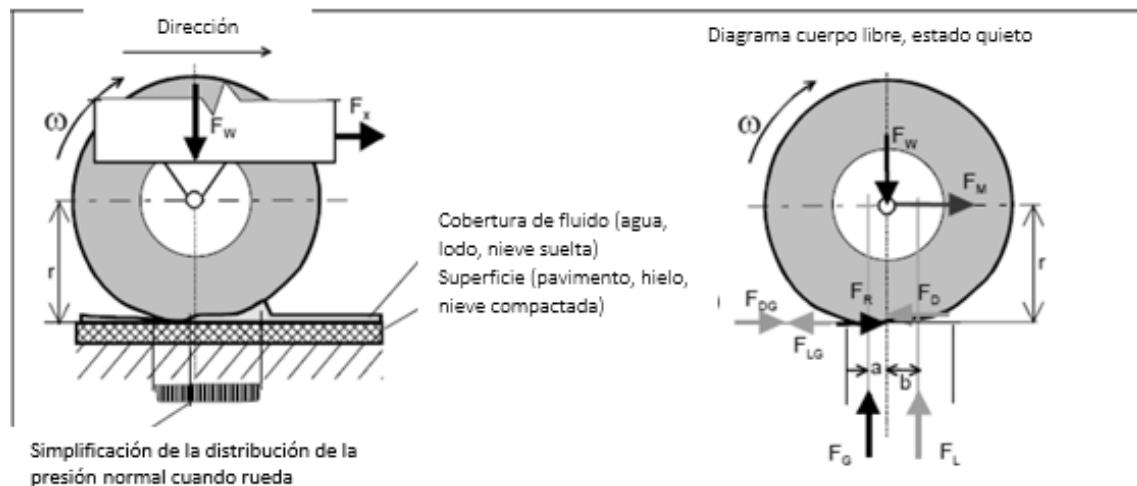


Figura 3. Fuerzas y momentos en frenado constante con fluido

Fuente: NCHRP, 2009

La fuerza medida horizontal se determina como:

$$F_M = F_D - F_{DG} + F_{LG} - F_R \quad (19)$$

Sustituyendo F_{DG} y para F_{LG} :

$$F_M = \frac{t}{2 * r} F_D + \frac{b}{r} * F_L - F_R \quad (20)$$

$$F_R = \frac{a}{r} (F_W - F_L) \quad (21)$$

Sustituyendo F_R y simplificando:

$$F_M = \frac{t}{2 * r} * F_D + \frac{a + b}{r} * F_L - \frac{a}{r} * F_W \quad (22)$$

De esta manera se obtienen las fuerzas del sistema

1.4 Fricción lateral

Otro aspecto importante de la fricción se refiere a la fricción lateral o fuerza lateral que se produce cuando un vehículo cambia de dirección, compensa la pendiente transversal o los efectos del viento transversal. La relación entre las fuerzas que actúan sobre las llantas del vehículo y la superficie del pavimento con la dirección del vehículo alrededor de una curva, los cambios de carril y la compensación de las fuerzas laterales es como sigue (NCHRP, 2009).

$$F_s = \frac{V^2}{15 * R} - e \quad (23)$$

Donde: F_s es la fricción lateral, V es la velocidad del vehículo, R es el radio, e es el peralte, P es la fuerza centrípeta y a : ángulo de peralte

Esta ecuación se basa en el diagrama de fuerza de dirección, interacción entre pavimento, llantas y curvas, a continuación, se muestra cómo el factor de fuerza lateral de fricción actúa como un contrapeso a la fuerza centrípeta en el desarrollo de un movimiento lateral, respecto a las variables mencionadas (Figura 4).

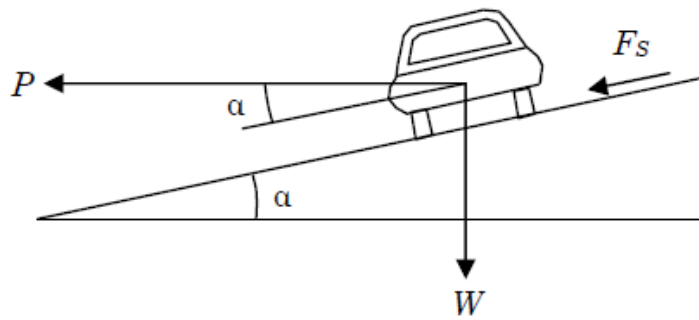


Figura 4. Diagrama de la interacción del vehículo para la ecuación anterior

Fuente: Elaboración propia

2. ECUACIONES PARA EL DISEÑO DE DISTANCIAS DE VISIBILIDAD RELACIONADAS

De acuerdo con la información anteriormente presentada, se abordarán algunos parámetros del diseño geométrico que pueden ser impactados por los cambios en la fricción, las ecuaciones de diseño aquí abordadas son ecuaciones genéricas presentadas en el manual de diseño geométrico de los Estados Unidos (AASHTO, 2011) y de Colombia (INVIAS, 2008).

2.1 Distancia de visibilidad de decisión y parada

La distancia de visibilidad de parada se define como la distancia necesaria para que un vehículo pueda realizar la maniobra de frenado al circular a la velocidad específica del elemento, esta distancia se debe evaluar en las condiciones más críticas posibles para ese elemento (INVIAS, 2008).

La ecuación usada para calcular la visibilidad de parada según AASHTO (2011) es:

$$Dp = (0.278 * V * t) + (0.039 * \frac{V^2}{a}) \quad (24)$$

Dónde: Dp es la distancia de visibilidad de parada [m], V es la velocidad del elemento sobre el cual se ejerce la maniobra de frenado [km/h], t es el tiempo de percepción – reacción, igual a 2.5 [s] y a es la tasa de desaceleración, igual a 3.4 [m/s²]

Y para carreteras con pendientes de rasante superiores a tres por ciento (3%), tanto en ascenso (+p) como en descenso (-p), se deberá realizar la corrección necesaria a las distancias de visibilidad de parada, utilizando la siguiente ecuación según AASHTO (2011).

$$d = \frac{V^2}{254 * \left(\frac{a}{9.81} \pm \frac{p}{100} \right)} \quad (25)$$

$$Dp = (0.695 * V) + d \quad (26)$$

Donde: d es la distancia recorrida durante el frenado [m] y p es la pendiente de rampa en [%].

Las condiciones planteadas en las ecuaciones anteriores se sugieren teniendo en cuenta un pavimento húmedo, sin embargo, la pluviosidad afecta el factor de fricción, ya que depende de la lámina de agua presente y las condiciones de la vía.

Por lo general, la distancia de visibilidad de parada es suficiente para permitir que los conductores puedan llegar a una parada precipitada en circunstancias ordinarias; sin embargo, pueden ser necesarias mayores distancia donde los conductores deben tomar decisiones complejas o instantáneas, donde la información es difícil de percibir o cuando se prevén maniobras inesperadas; por ejemplo limitar la visibilidad de parada a lo necesario puede impedir la realización de maniobras evasivas que a menudo implican menos riesgo y son preferibles.

Es así evidente que hay muchos lugares en los que sería prudente prever distancias de visibilidad más largas. En estas circunstancias, la distancia de visibilidad de decisión ofrece la visibilidad que los conductores necesitan.

Los conductores necesitan distancias de visibilidad de decisión cada vez que hay probabilidad de error, ya sea en la recepción de la información, la toma de decisiones o acciones de control.

Algunos ejemplos de lugares críticos donde este tipo de errores se pueden producir y donde es deseable proporcionar distancia de decisión de parada, incluyen lugares de intercambio y de intersección donde se necesitan maniobras inusuales, cambios en la sección transversal, tales como plazas de peaje y las áreas de demanda concentrada donde no se permite la presencia de las fuentes de información de la competencia debido a la “contaminación visual”.

La distancia de visibilidad de decisión se define de acuerdo al tipo de maniobra así:

- Maniobra evasiva A: Parada en carretera rural, $t = 3.0$ s
- Maniobra evasiva B: Parada en carretera urbana, $t = 9.1$ s
- Maniobra evasiva C: Cambio de velocidad en camino/carretera rural, t varía entre 10.2 y 11.2 s
- Maniobra evasiva D: Cambio de velocidad en camino/carretera sub-urbana, t varía

entre 12.1 y 12.9 s

- Maniobra evasiva E: Cambio de velocidad en camino/carretera urbana, t varía entre 14.0 y 14.5 s

De esa manera para las maniobras A y B se tiene la distancia de visibilidad de parada y para las maniobras C, D y E se determina como:

$$DSD = 0.278 * V * t \quad (27)$$

Donde: DSD es la distancia de visibilidad de decisión [m], V es la velocidad de diseño [km/h] y t es el tiempo de pre-maniobra [S].

2.2 Distancia de visibilidad de cruce

Se define como la distancia necesaria para que un vehículo que se dirige a una intersección pueda realizar la maniobra de frenado al circular a la velocidad del elemento, esta distancia se debe evaluar en las condiciones más críticas posibles para ese elemento.

Las relaciones entre el espacio, el tiempo y la velocidad, definen el triángulo de visibilidad requerido, libre de obstrucciones, o el establecimiento de las modificaciones necesarias en la velocidad de aproximación a los accesos cuando se usa un triángulo de visibilidad de dimensiones menores a la requerida. (INVIAS, 2008)

La distancia mínima de visibilidad de cruce necesaria a lo largo de la calzada principal se debe calcular mediante la siguiente expresión (INVIAS, 2008):

$$d = 0.278 * V_e * (t_1 + t_2) \quad (28)$$

Donde: d es la distancia mínima de visibilidad lateral requerida a lo largo de la calzada principal, medida desde la intersección, correspondiente a la distancia que existe entre el que circula por la vía principal y el punto de intersección con el vehículo que circula por la vía contraria en [m], V_e es la velocidad específica de la calzada principal [km/h] que corresponde a la velocidad específica del elemento de la calzada principal inmediatamente antes del sitio de cruce [m/s], t_1 es el tiempo de percepción-reacción del conductor que cruza [2.5 s] y t_2 es el tiempo para acelerar por quien conduce por la calzada secundaria, y recorrer la distancia entre el punto de inicio de la interacción con la otra calzada y el punto seguro al cruzar la calzada principal [s].

En t_1 está incluido el tiempo necesario para que el conductor de un vehículo detenido por el "PARE" sobre la vía secundaria, vea en ambas direcciones sobre la vía principal y deduzca si dispone del intervalo suficiente para cruzarla con seguridad y para que engrane su velocidad, previamente al arranque (INVIAS, 2008), pero el tiempo t_2 necesario para recorrer la distancia S depende de la aceleración de cada vehículo. La distancia S se calcula

como la suma de:

$$S = D + W + L \quad (29)$$

Dónde: S es la distancia recorrida por quien conduce por la calzada secundaria entre el punto de inicio de la interacción con la otra calzada y el punto seguro al cruzar la calzada principal, D es la distancia entre el vehículo parado y la orilla de la calzada principal [3.0 m], W es el ancho de la calzada principal [m] y L es la longitud total del vehículo [m]; así el valor de t_2 se obtiene de:

$$t_2 = \sqrt{\frac{2 * (D + W + L)}{9.8 * a}} \quad (30)$$

Dónde: D es la distancia entre el vehículo parado y la orilla de la calzada principal [3.0 m], W es el ancho de la calzada principal [m], L depende del tipo de vehículo, siendo 20.89 m para vehículos articulados (tracto camión con semirremolque), 11.00 m para camión de dos ejes y 5.00 m para vehículos livianos y a es la aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce [m/s^2], siendo 0.055 para vehículos articulados, 0.075 para camiones de dos ejes y 0.150 para vehículos livianos.

2.3 Distancia de visibilidad de adelantamiento

Se dice que un tramo de carretera tiene distancia de visibilidad de adelantamiento, cuando la distancia de visibilidad en ese tramo es suficiente para que, en condiciones de seguridad, el conductor de un vehículo pueda adelantar a otro que circula por el mismo carril a una velocidad menor, sin peligro de interferir con un tercer vehículo que venga en sentido contrario y se haga visible al iniciarse la maniobra de adelantamiento. Debe considerarse únicamente para las carreteras de dos carriles con tránsito en las dos direcciones, donde el adelantamiento se realiza en el carril del sentido opuesto (INVIAS, 2008), se determina como la suma de cuatro distancias, así:

$$Da = D1 + D2 + D3 + D4 \quad (31)$$

Dónde: $D1$ es la distancia recorrida durante el tiempo de percepción y reacción [m], $D2$ es la distancia recorrida por el vehículo que adelanta durante el tiempo desde que invade el carril del sentido contrario hasta que regresa a su carril [m], $D3$ es la distancia de seguridad, una vez terminada la maniobra, entre el vehículo que adelanta y el vehículo que viene en la dirección opuesta [m] y $D4$ es la distancia recorrida por el vehículo que viene en sentido opuesto (estimada en $2/3$ de $D2$) [m]

Por seguridad, la maniobra de adelantamiento se calcula con la velocidad específica de la

entre-tangencia horizontal en la que se efectúa la maniobra (INVIAS, 2008), acorde a lo siguiente:

$$D_1 = 0.278 * t_1 * \left(V - m + \frac{a * t_1}{2} \right) \quad (32)$$

Dónde: t_1 es el tiempo de la maniobra inicial [s], V es la velocidad del vehículo que adelanta [km/h], a es el promedio de aceleración que el vehículo necesita para iniciar el adelantamiento [km/h/s] y m es la diferencia de velocidades entre el vehículo que adelanta y el que es adelantado [15 km/h] en todos los casos, así el valor para D_2 es como sigue:

$$D_2 = 0.278 * V * t^2 \quad (33)$$

Donde: V es la velocidad del vehículo que adelanta [km/h] y t_2 : es el tiempo empleado por el vehículo al realizar la maniobra para volver a su carril [s]; por último, la distancia D_3 varía entre 30 y 90 m de acuerdo a la velocidad y D_4 es $\frac{2}{3} * D_2$

2.4 Distancia de visibilidad de encuentro

En las carreteras terciarias de una calzada y sin diferenciación de carriles, la distancia de visibilidad de encuentro es la longitud mínima disponible de carretera, visible para los conductores que circulan en sentidos opuestos, obligados a llevar a cabo la maniobra para esquivarse. Esta longitud debe ser lo suficientemente larga, para permitirle a los vehículos que viajan a la velocidad de diseño en sentidos contrarios, esquivarse y cruzarse con seguridad a una velocidad de 10 Km/h (INVIAS,1998); se debe determinar con base a un tiempo de percepción-reacción de un segundo y una desaceleración similar a la de frenado hasta esquivarse y cruzarse a una velocidad de 10 Km/h, mediante la siguiente relación, donde: V_d es la velocidad de diseño [km/h], f_l es el coeficiente de fricción longitudinal llanta-pavimento y p es la pendiente de la rasante [tanto por uno], + ascenso, - descenso así:

$$D_e = 2 * (0.278 * V_d) + \left[\frac{V_d^2 - 100}{254 * (f_l + p)} \right] + \left[\frac{V_d^2 - 100}{254 * (f_l - p)} \right] \quad (34)$$

3. IMPACTO SOBRE EL RADIO DE CURVATURA ASOCIADO CON LA FRICCIÓN TRANSVERSAL

El radio de curvatura está directamente relacionado con la ecuación de equilibrio, esta ecuación permite definir la relación entre el radio R_c de la curva horizontal, la Velocidad específica (V_{ch}), el peralte (e) y la fricción transversal (f_t), con la cual se tiene el equilibrio de las fuerzas que participan en la circulación del vehículo en la curva evitando el deslizamiento hacia la parte externa de la curva (INVIAS, 2008). La ecuación que asocia estas variables es la siguiente:

$$R_c = \frac{V_{ch}^2}{127 * (e + f_t)} \quad (35)$$

El coeficiente f_t está determinado por numerosos factores, entre los cuales se encuentra el estado de la superficie de rodadura, la velocidad del vehículo, el tipo y condiciones de las llantas de los vehículos. Se adoptan los valores del coeficiente de fricción transversal máxima indicados por los estudios recientes de la AASHTO como se presentan en la Tabla 1.

4. ANALISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con lo señalado en la sección 1.1, en las Ecuaciones 7, 8 y 9 se puede ver que el coeficiente de fricción depende únicamente de la relación entre la aceleración que pueda presentar el coeficiente a y el radio de las llantas, es evidente que la fuerza ejercida por el vehículo sobre el pavimento no tiene influencia en la ecuación debido al recíproco que se genera en la superficie de contacto.

En la sección 1.2, en las Ecuaciones 10 a 14 se observa como la fuerza resistente depende de la fuerza del vehículo y de la relación que exista entre el par aplicado y el radio de la llanta, para las mediciones de fricción de las superficies limpias, secas y rígidas.

En el análisis realizado en la sección 1.3 se puede observar como hay una gran complejidad en la interacción con líquido, puesto que intervienen muchas más fuerzas como lo demuestra especialmente la Ecuación 22, que presenta en definitiva el resultado de la interacción.

Al analizar la distancia de visibilidad de parada, con una velocidad de 110 Km/h, el tiempo de percepción-reacción y aceleración sugerida; el valor de la D_p es de 215.2 m, con una reducción del 29% del SN el valor de la D_p aumenta a 265.2 que representa un 23.2% respecto al que cuenta con datos estándar, este concepto se analiza con mucha más profundidad en Sánchez (2015).

Tabla 1. Valores del coeficiente de fricción transversal máxima de acuerdo a las velocidades específicas

| | | | | | | |
|---|------|------|------|------|------|------|
| Velocidad específica [km/h] | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 |
| Coeficiente de fricción transversal máxima $F(t_{max})$ | 0.35 | 0.28 | 0.23 | 0.19 | 0.17 | 0.15 |
| Velocidad específica [km/h] | 80 | 90 | 100 | 110 | 120 | 130 |
| Coeficiente de fricción transversal máxima $F(t_{max})$ | 0.14 | 0.13 | 0.12 | 0.11 | 0.09 | 0.08 |

Fuente: INVIAS, 2008

Al analizar la distancia de visibilidad de parada en pendiente ascendente, respecto a los mismos elementos utilizados en el análisis para pendientes menores al 3%, se tiene que para una velocidad de 110 Km/h, una pendiente de 4%, una aceleración y un tiempo de frenando estándar su valor es de 199.7 m y su SN corresponde a 35%; para un valor 26.5% menor de SN la D_p es de 238.0 m con las mismas condiciones pero con aceleración de 2.5 (m/s^2) lo que significa un aumento del 19% en la D_p , este concepto se analiza con mucha más profundidad en Sánchez (2015).

Al analizar la distancia de visibilidad de parada en pendiente descendente, respecto a los mismos elementos utilizados en el análisis para pendientes menores al 3%, se tiene que para una velocidad de 110 Km/h, una pendiente de -4%, una aceleración y un tiempo de frenando estándar su valor es de 231.8 m y su SN corresponde al 35%; para un valor 28% menor de SN la D_p es de 298.2 m con las mismas condiciones pero con aceleración de 2.5 (m/s^2) lo que significa un aumento del 29% en la D_p respecto a la estándar.

La distancia de visibilidad de cruce tiene una clara incidencia del factor de aceleración longitudinal que puede hacer variar significativamente su valor, esto significa que la sensibilidad del valor descrito como a es muy alta; como puede observarse en las Ecuaciones 28, 29 y 30, donde existen únicamente 3 coeficientes para la aceleración del vehículo que realiza la maniobra de cruce, estos coeficientes no deberían ser tan generales porque no recogen el global de las características de los vehículos que circulan por la intersección.

En la distancia de visibilidad de adelantamiento, Ecuaciones 31, 32 y 33, se encuentra una suma de distancias en las cuales se involucra la aceleración en cada una de manera directa, pues hay cambios de velocidad en todas las maniobras, sin embargo la aceleración en esta maniobra no es total, es decir los cambios se realizan y hay presencia de aceleración pero no se llega al frenado total ni al derrape, la ecuación presentada para la distancia recorrida durante el tiempo de percepción reacción presenta un término de aceleración a en unidades de Km/h/s, sin embargo para cada una de las variables de distancia involucradas debiese existir una relación con dicha aceleración, esta relación involucra la fricción, puesto que en condiciones de velocidad elevadas e hidro-climatología adversa la asociación con esta variable es indispensable para la seguridad, existen impactos que no son cuantificados de manera directa por la ecuaciones mostradas.

La distancia de visibilidad de encuentro, presenta la incidencia de un factor de aceleración longitudinal presentado en las ecuaciones de distancia de visibilidad de parada, y hace que varíe notablemente el denominador de la Ecuación 34, el análisis debe realizarse de manera diferente, pues este parámetro es aplicable a carreteras de tercer nivel (vías en pavimento afirmado o ripio generalmente), el impacto de esta superficie sumado a la condición de lluvia predominante sobre la ecuación y los vehículos de diseño que actualmente se encuentran el mercado, merece un estudio más profundo de la fricción y su interacción con el medio.

El radio de curvatura tiene una relación directa con la fricción transversal, también es igual a la suma de la fuerza de contacto normal y las fuerzas de levantamiento del fluido, por este motivo, entre mayores sean las fuerzas de levantamiento del fluido mayor será la incidencia, esto disminuirá proporcionalmente la razón que simboliza el SN, de esta manera la afectación se produce en dos direcciones, la fricción transversal que interviene en la determinación del radio de curvatura se ve claramente influenciada por el factor de fricción transversal y la fuerza centrípeta se ve impactada de manera directa.

5. CONCLUSIONES

El número de resistencia al deslizamiento SN, depende únicamente de la fuerza longitudinal F_x y la carga que actúa sobre el eje F_z que también es igual a la suma de la fuerza de contacto normal y las fuerzas de levantamiento del fluido [KN]

Los cambios respecto al factor a tienen un gran impacto sobre la ecuación de distancia de visibilidad de parada y esta comparación sugiere mejoras necesarias al tecnicismo con que se evalúa dicho parámetro de diseño, especialmente a velocidades altas.

La ecuación para la distancia de visibilidad de parada debe intervenir haciendo que el factor de aceleración varíe pues este tiene un gran impacto sobre la misma, reduciendo o aumentando en un amplio rango el valor real, la representación de la ecuación de acuerdo al SN mejorará considerablemente el diseño geométrico.

Se sugiere que la distancia de visibilidad de cruce se ajuste a una gama más amplia de coeficientes de aceleración para la adecuada descripción de los vehículos de la actualidad, en función del vehículo de diseño predominante en la intersección, de igual manera se sugiere un estudio relacionado con fricción para intersecciones, ya que la interacción entre vehículos es de vital importancia en el diseño de dichos elementos viales

La distancia de visibilidad de adelantamiento presenta una influencia directa de la fricción durante las maniobras de arranque y aceleración, pero dicha ecuación podría modificarse para que el planteamiento empírico del cual proviene, fuese desarrollado a cabalidad.

Se sugiere la elaboración de un estudio similar al presentado para la obtención de coeficientes de fricción transversal, puesto que como se ve en la Tabla 1 y la Ecuación 35, estos dependen de la velocidad, de la oferta y demanda de fricción, dichas dependencias se generalizan, sin embargo, los impactos por su presencia generan cambios importantes en la cuantificación de su valor.

Los impactos económicos son considerables en relación con la mejora o reducción de la fricción del pavimento, el incremento en la fricción se relaciona directamente con la seguridad, el diseño y la restauración de pavimentos; de igual forma impactan la relación

costo beneficio para los usuarios; la adopción de medidas que mejoren la fricción mejorará la productividad y eficiencia de la vía.

AGRADECIMIENTOS

Este artículo fue elaborado gracias al apoyo de la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín, especialmente su grupo de investigación en vías y transporte (VITRA); al ingeniero de transporte Shuo Li del Departamento de Transporte de Indiana – División de Investigación y Desarrollo, y al estudiante de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín, Santiago Ospina De Los Ríos; quienes aportaron para la ejecución de esta investigación su disponibilidad, interés y amable contribución conceptual de manera puntual y generosa.

REFERENCIAS

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO. (2011). *A Policy on Geometric Design of Highways and Streets (6th Edition)*. United States.
- FWA, T. F., Y ONG, G. P. (2008). *Wet-Pavement Hydroplaning Risk and Skid Resistance*. Modeling. Journal of Transportation Engineering [en línea], 134(5), 182–190.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVIAS. (1998). *Manual de diseño geométrico de carreteras de Colombia*. Colombia
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS, INVIAS. (2008). *Manual de diseño geométrico de carreteras de Colombia*. Colombia.
- JU, F., FWA, T. F., Y ONG, G. P. (2013). *Evaluating Wet Weather Driving Benefits Of Grooved Pavements*. pp 287–293.
- NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM, NCHRP (2009). *Guide for Pavement Friction. National Cooperative Highway Research Program*.
- POSADA, J., SÁNCHEZ, L., Y ZAPATA, J. (2014). *Conceptos para la incursión de carreteras multicarril en Colombia*. Actas del XVIII Congreso Panamericano de Ingeniería de Tránsito y Transporte, 11-13 Junio 2014, Santander.
- SÁNCHEZ L. (2015). *La fricción en las vías y las características hidro-climáticas del entorno, análisis de la interacción y conceptos aplicables*. Tesis de pregrado. Universidad Nacional de Colombia – sede Medellín, Medellín, Colombia.

53 Estudo das patologias de pavimentação na região central de Formosa/Goiás/Brasil

Wemerson Rodrigues Caixêta

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Formosa, Brasil

Jaquelline da Silva Feitoza

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campi Itapetininga, Brasil

RESUMO

A cidade de Formosa/Goiás/Brasil apresenta surgimento prematuro e recorrente de patologias em seus pavimentos. Neste trabalho tais problemas são avaliados visualmente, segundo o Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT), referente às normas TER 005/2003 e PRO 009/2003, em um perímetro no centro da cidade, dividido em cinco trechos de aproximadamente 400 metros, que abrange partes das principais ruas e avenidas do centro histórico, político e comercial da cidade, a citar: Avenida Bosque, Rua Hugo Lobo e Rua Visconde de Porto Seguro. O presente trabalho objetivou ainda relacionar cada patologia ao seu agente causador, além de propor possíveis soluções para as mesmas. Os resultados obtidos têm como base os levantamentos visuais realizados que, através dos cálculos dos Valores de Serventia Atual (VSA), indicaram vias com conceitos entre ruim e péssimo.

Palavras-chave: Patologia, Pavimento Flexível, Camadas, Recuperação.

1. INTRODUÇÃO

A população que vive nos grandes centros convive atualmente com uma crescente necessidade de se locomover de um lugar para outro, além de transportar matéria-prima para a indústria e os bens de consumo oriundos ou não da mesma. Para tanto, na maioria das vezes utiliza-se o transporte rodoviário. A fim de resistirem aos esforços oriundos do tráfego, as vias urbanas são, na maioria, revestidas com materiais flexíveis, são eles: Concreto Betuminoso Usinado à Quente (CBUQ) ou Areia Asfalto Usinada à Quente (AAUQ). Tais materiais devem ser capazes de absorver e transmitir de forma atenuada a carga às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento, proporcionando conforto e segurança ao usuário da via (BERNUCCI et al., 2008).

Para Bernucci et al. (2008),

“Pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas, construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinada técnica e economicamente a resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima, e a propiciar aos usuários melhoria nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.”

Os pavimentos podem ser classificados quanto à sua constituição principal, sejam construídos em concreto de cimento Portland ou em ligante betuminoso. Nesse contexto, os pavimentos rodoviários classificam-se em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Porém, atualmente há uma tendência em se utilizar apenas pavimentos de concreto de cimento Portland e pavimentos asfálticos, respectivamente, para indicar o tipo de revestimento do pavimento. Existem ainda os pavimentos semirrígidos, que se caracterizam por uma base cimentada revestida por uma camada asfáltica (Bernucci et al., 2008; DNIT, 2006a).

Os pavimentos rígidos são compostos, em geral, por uma camada superficial de concreto de cimento Portland, apoiada geralmente sobre uma camada com material granular ou sobre uma camada estabilizada com cimento (chamada sub-base), assentada sobre o subleito ou sobre o reforço do subleito. Já os pavimentos flexíveis – geralmente associados a pavimentos asfálticos – são compostos por uma camada superficial asfáltica (revestimento), disposta sobre camadas de base, sub-base e reforço de subleito, constituídas por materiais granulares, solos e/ou misturas de solos, sem adição de cimentos (Bernucci et al., 2008).

A estrutura dos pavimentos é subdividida em camadas, que são seções transversais típicas dos pavimentos, com todas as camadas possíveis. São formadas por uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais determinados por um dos diversos métodos de dimensionamento. Normalmente utiliza-se a seguinte conformação: subleito, base e revestimento, podendo haver camadas intermediárias, caso necessário (Senço, 2007).

O subleito é o terreno de fundação do pavimento. Se a terraplenagem é jovem, o subleito deverá apresentar as características geométricas definitivas. No caso de uma estrada de terra em uso há algum tempo e que se deseja pavimentar, o subleito é irregular devido ao próprio uso e aos serviços de conservação, podendo então ser acrescentada sobre tal camada aquela que é denominada regularização. Já a base, segundo Horonjeff (Quirino, 2013), é a camada situada imediatamente abaixo do revestimento, pode ser construída de pedra britada, com tratamento ou não, ou de materiais granulares misturados com ligantes tais como asfalto ou cimento Portland. Ainda segundo o autor, a função da base, que é a camada estruturalmente mais importante, é de resistir a elevadas tensões de cisalhamento e distribuí-las às camadas subjacentes. Por fim, para Bernucci et al. (2008), o revestimento, camada mais nobre do pavimento, é destinada a receber a carga oriunda do tráfego dos veículos, e mais diretamente a ação climática. Portanto, tal camada deve ser tanto quanto possível impermeável e

resistente aos esforços de contato pneu-pavimento, que variam de acordo com a velocidade e a carga dos veículos. Conforme Senço (2007), o revestimento é a camada destinada a melhorar a superfície de rolamento quanto às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura.

Estudos realizados por Pelisson et al. (2015) sobre o efeito da variação da espessura das camadas dos pavimentos mostram que esse fator está diretamente ligado ao surgimento de patologias. Constatou-se que, independente das conformações das camadas subjacentes, a espessura do revestimento foi o parâmetro de maior influência no surgimento de defeitos permanentes, principalmente no que se refere ao defeito trincas. No Brasil, ainda segundo os autores, tem-se ignorado todas as evidências relacionadas à importância da espessura do revestimento asfáltico, com a adoção de valores que, se por um lado representam alguma economia na construção, por outro resultam em custos elevados de manutenção e reabilitação.

Apesar de a deterioração do pavimento estar ligada à funcionalidade de todas as camadas que o constitui, do ponto de vista do usuário, o estado superficial do pavimento é o de maior importância, uma vez que os defeitos e irregularidades nessa camada são mais facilmente observados pelos usuários, pois afetam seu conforto. Quando o conforto é afetado, os veículos também sofrem mais intensamente as consequências. Tais consequências geram maiores custos com manutenção dos veículos, consumo, tempo de viagem, dentre outros. Portanto, atender o conforto ao rolamento acarreta economia nos custos de transporte (Bernucci et al., 2008).

A grande maioria dos pavimentos do Brasil proporcionam baixo conforto ao rolamento, incluindo até mesmo trechos concessionados. A falta de investimento em infraestrutura rodoviária remete à perda de competitividade dos produtos brasileiros, que na fase de produção apresentam alta qualidade, perdida na fase de transporte devido a deficiência da malha viária nacional, uma vez que a maior parte da produção é escoada através das rodovias (Bernucci et al., 2008).

Segundo dados da Confederação Nacional do Transporte (CNT), mais da metade das rodovias, tanto estaduais quanto federais do estado de Goiás, apresentam conceitos entre regular e ruim, no que diz respeito à condição do pavimento. Ainda segundo a pesquisa, menos de um terço das rodovias do estado são federais, e são elas as que apresentam melhores condições de rolagem.

Em 2013, os valores autorizados pela União para investimento em infraestrutura de transporte chegaram a R\$ 16,2 bilhões, o que representa um aumento de 159,5% em relação ao ano de 2003, descontada a inflação acumulada no período. Porém, cerca de 40% desse montante não foi dispendido. Entre 2003 e 2013, aproximadamente 70% do total autorizado pelo governo federal para investimento em infraestrutura de transporte foi destinado às

rodovias. Todavia, nem todo o capital disponibilizado pelo governo é empregado. No citado ano, por exemplo, aproximadamente R\$ 3,6 bilhões, cerca de 30% da quantia autorizada para investimentos em rodovias nesse ano, deixaram de ser empregados em melhorias no transporte viário nacional (CNT, 2014).

Estima-se que cerca de R\$ 293,88 bilhões, montante que representa 29,77% do total estimado para todo o setor de transporte e logística brasileiro, sejam necessários para que haja a dinamização do transporte rodoviário nacional. Tal recurso seria destinado à intervenções classificadas em adequação, duplicação, recuperação, construção e pavimentação de rodovias (CNT, 2014).

Os investimentos em ampliação e recuperação da malha viária nacional são insatisfatórios e inaceitáveis, sendo necessário um envolvimento em discussões de todos os elementos da cadeia de produção da pavimentação asfáltica. Compondo essa cadeia estão principalmente as universidades, atuando em três vertentes fundamentais: ensino, pesquisa e extensão (Bernucci et al., 2008).

A cidade de Formosa, um dos 236 municípios do estado de Goiás, tem uma população de aproximadamente 110 mil habitantes, distribuídos em aproximadamente 6 mil quilômetros quadrados de área, resultando numa densidade demográfica de aproximadamente 17 habitantes por quilômetro quadrado. Sua economia é movida principalmente pelos setores de serviços e indústria, além do setor agropecuário. A frota de veículos do município é de aproximadamente 67 mil veículos, o que representa uma frota de 0,6 veículos por habitante, um índice baixo em comparação com a frota da capital do estado, Goiânia (IBGE, 2014).

No presente trabalho, avaliou-se visualmente algumas das principais vias do bairro central da cidade de Formosa/GO, a citar: Avenida Bosque, Rua Hugo Lobo e Rua Visconde de Porto Seguro. Os trechos avaliados abrangem o principal centro comercial da cidade, e apesar de se tratarem, na maior parte, de veículos de pequeno e médio porte, o tráfego é intenso durante todo o horário comercial, fazendo com que o pavimento sofra uma intensiva solicitação, o que acarreta em seu prematuro desgaste, culminando no aparecimento das patologias. Uma vez escolhidas as vias, realizou-se o levantamento visual das patologias, objetivando avaliar a situação da superfície do pavimento, visando compreender as principais causas da deterioração precoce de tal estrutura na cidade. Vale ressaltar que o pavimento das vias avaliadas é classificado como pavimento flexível e o material utilizado no revestimento é o CBUQ.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia aplicada no presente trabalho é a adotada por Cavalcante et al. (2012), atinente às normas DNIT (2003a; 2003c), que consiste em avaliar a superfície do pavimento realizando o levantamento visual contínuo em cada trecho estudado. Tal avaliação, como

citado anteriormente, é preconizada pela norma DNIT (2003c), e consiste na avaliação subjetiva da superfície dos pavimentos.

O procedimento para a avaliação subjetiva dos pavimentos asfálticos brasileiros foi adaptado da metodologia desenvolvida pela American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), para a determinação do VSA (DNIT, 2006b).

Inicialmente realizou-se a escolha das vias a serem avaliadas com o auxílio do software Google Earth, tomando os trechos de maior importância para a cidade. Os trechos escolhidos são representados na Figura 1.

O Trecho 01 compreende uma porção da Avenida Bosque, o qual inicia-se no semáforo do entroncamento com a Avenida Lagoa Feia e encerra-se na esquina da Praça da Catedral. O Trecho 02 inicia-se imediatamente após o final do trecho anterior e se estende até a esquina da Prefeitura Municipal, e também compreende uma porção da Avenida Bosque. Já o Trecho 03 é composto pela porção final da Avenida Bosque e a Rua Hugo Lobo inicia-se imediatamente após o final do trecho anterior, contorna a Praça da Prefeitura e segue até o entroncamento da Rua Hugo Lobo com a Rua Visconde de Porto Seguro. O Trecho 04 compreende uma porção da Rua Visconde de Porto Seguro, principal centro comercial da cidade; inicia-se imediatamente após o final do trecho anterior e segue até a esquina da Praça da Catedral. Por fim, o Trecho 05 também compreende uma porção da Rua Visconde de Porto Seguro; inicia-se imediatamente após o término do trecho anterior e se estende até o semáforo de entroncamento com a Avenida Lagoa Feia, fechando assim o perímetro de aproximadamente 2 km.

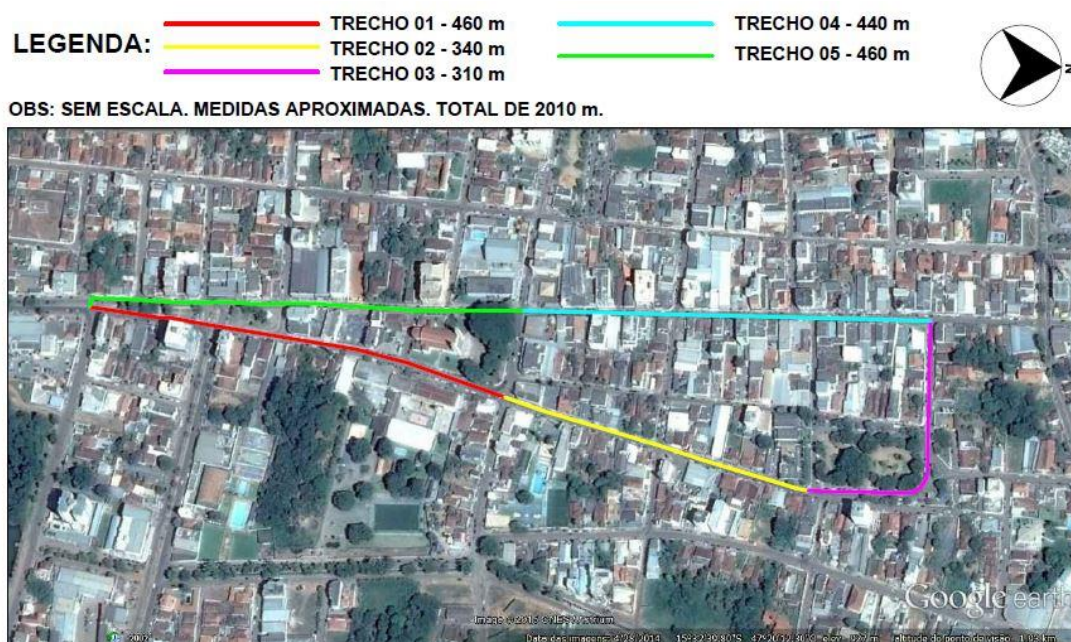


Figura 1. Divisão de trechos

Os materiais utilizados no presente trabalho foram simplificados, uma vez que a classificação das patologias de pavimentos flexíveis, no que diz respeito ao VSA, empregada pela norma DNIT (2003c), são somente de cunho visual. Para tanto, utilizaram-se máquina fotográfica digital, prancha com papel e caneta, além do modelo de ficha de avaliação de serventia.

Realizaram-se visitas ao perímetro escolhido a fim de avaliar qual data e horário seria o mais propício para a aplicação da avaliação, uma vez que se trata da região central da cidade, o que faz com que o tráfego de veículos e pedestres, bem como a quantidade de veículos estacionados, seja elevado em horário comercial, o que dificulta a avaliação. Após realizadas as visitas supracitadas, concluiu-se que a data e horário que melhor atenderia à norma DNIT (2003c) seriam nos finais de semana, sábado ou domingo, no turno vespertino.

O procedimento da avaliação foi realizado no primeiro domingo do mês de junho do ano de 2015, no turno vespertino. O mesmo ocorreu percorrendo-se os trechos predeterminados, onde se visualizava patologias de acordo com as apresentadas na literatura, fazia-se registros fotográficos e escritos, descrevendo os principais defeitos de cada trecho e assinalando, ao fim de cada trecho, o valor de serventia atual (VSA) para o trecho em questão na ficha de avaliação de serventia, conforme a norma DNIT (2003c).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O objetivo principal do pavimento é atender adequadamente às suas funções básicas. Portanto, deve ser ele concebido, projetado, construído e conservado de forma a apresentar níveis aceitáveis de serventia, os quais são avaliados através da apreciação de três características gerais de desempenho: a segurança, o conforto e a economia (DNIT, 2006a).

No que diz respeito às funcionalidades do revestimento, este deve ser o tanto quanto possível impermeável e resistente aos esforços oriundos do tráfego, a fim de atender às condições de conforto e segurança, além de resistir ao desgaste, aumentando a durabilidade da estrutura. A água apresenta-se como principal inimiga dos pavimentos, pois uma vez que a mesma penetra nas camadas destes, pode vir a enfraquece-las, diminuindo de maneira significativa a capacidade de suporte de tais estruturas ao afeito do tráfego dos veículos (Silva, 2005).

No que se refere às patologias encontradas no perímetro estudado tem-se, entre outras causas, para a deterioração do revestimento: a ação do tráfego, o intemperismo, a recuperação ou manutenção ineficiente dos pavimentos e o uso de materiais inadequados em sua construção.

Realizando a avaliação baseada na norma DNIT (2003c), conforme ficha de avaliação de serventia, obtiveram-se, para cada trecho avaliado, os resultados expressos na Tabela 1.

Tabela 1. Resultados dos Valores de Serventia Atuais por Trecho

| Trecho avaliado | Valor de Serventia Atual (VSA) |
|-----------------|--------------------------------|
| Trecho 01 | 1.0 |
| Trecho 02 | 1.5 |
| Trecho 03 | 1.3 |
| Trecho 04 | 2.0 |
| Trecho 05 | 0.8 |

Tais resultados caracterizam a serventia dos Trechos 01 e 05 como péssimo, e dos Trechos 02, 03 e 04 como ruim (DNIT, 2003c).

Durante a avaliação pôde-se observar a existência de patologias diversas em todo o perímetro estudado. Dentre as patologias encontradas estiveram as trincas, sobretudo nos Trechos 03 e 04, tanto isoladas como em bloco tipo couro de jacaré (Figura 3), e as trincas isoladas transversais curtas, além de trincas isoladas longitudinais longas, conforme Figura 2.

Tais patologias decorrem de falhas na execução, na temperatura de compactação, ou até mesmo na dosagem da mistura asfáltica, além do envelhecimento do ligante asfáltico, recalque diferencial, ação da repetição de cargas do tráfego, ação climática, perda da flexibilidade, compactação deficiente do revestimento, entre outros (Bernucci et al., 2008).

As trincas interligadas tipo couro de jacaré que apresentam erosões (Figura 3) podem evoluir para panelas, uma vez que a região apresenta diminuição de resistência, podendo o revestimento vir a se desprender com o efeito do tráfego dos veículos. Tais patologias também foram observadas no perímetro avaliado, tanto apresentando como não erosões.

Observou-se ainda a existência de vários remendos – diga-se de passagem mal executados – durante todo o perímetro avaliado. No Trecho 01, por exemplo, a patologia aparece com tal frequência que chega a predominar sobre a superfície original do pavimento, conforme Figura 4. O remendo é resultado do preenchimento de depressões ou panelas com massa asfáltica, e é considerado um defeito por se tratar de uma região de fragilidade do pavimento e por provocar danos ao conforto ao rolamento (Bernucci et al., 2008).



Figura 2. Trincas isoladas no Trecho 03



Figura 3. Trinca interligada tipo couro de jacaré com erosão no Trecho 01



Figura 4. Remendos no Trecho 01

Observaram-se ainda a existência de desagregação ou desgastes, principalmente nos Trechos 01 e 05, como mostra a Figura 5. Tais patologias, em alguns casos, evoluíram para panelas que atingiram uma camada subjacente ao revestimento – além de aparecerem junto às bordas da via, durante todo o perímetro–, porém com características idênticas ao mesmo, evidenciando que o pavimento fora submetido à operação de recapeamento. A desagregação ou desgaste surge devido a falhas de adesividade ligante-agregado, o chamado *stripping*, ou ainda pela presença de água aprisionada, deficiência no teor de ligante, falha de bico, problemas executivos ou de projeto de misturas, segregação da massa asfáltica, entre outros (Bernucci et al., 2008).

Também foram observadas panelas durante todo o perímetro que, conforme citado anteriormente, evoluíram da desagregação do revestimento, como mostra a Figura 6. Estas podem ser causadas, ainda, pelo desprendimento do revestimento em áreas onde haviam trincas interligadas (Figura 3), falhas construtivas, deficiências na compactação, excesso de umidade nas camadas do solo, *stripping*, segregação ou por falhas na pintura de ligação em camadas de revestimento (Bernucci et al., 2008).

Apesar de ter apresentado maior serventia, também foram observadas no Trecho 04 todas as patologias citadas anteriormente, porém com menores frequência e severidade. Uma patologia em questão foi encontrada apenas no Trecho 04, a qual seja o escorregamento, conforme Figura 7. Tal patologia decorre do excesso de ligante, por falhas construtivas ou de pintura de ligação (Bernucci et al., 2008).

Vale ressaltar que, como é previsto, tal patologia foi observada ligeiramente antes de um semáforo, ou seja, numa área de frenagem. Ressalta-se ainda que no Trecho em questão, o fluxo de veículos é intenso, porém em baixas velocidades, o que pode ter contribuído para que o mesmo não sofresse tão severamente o efeito do tráfego.



Figura 5. Desgaste ou desagregação nos Trechos 01 e 05



Figura 6. Painéis nos Trechos 03 e 05



Figura 7. Escorregamento no Trecho 04

3. CONCLUSÃO

Os principais agentes causadores do surgimento de patologias nos pavimentos são basicamente a atuação do tráfego sobre uma estrutura de pavimentação que não apresenta capacidade de suporte nas camadas subjacentes de base e sub-base, e as ações climáticas, tais como temperaturas elevadas e altos índices pluviométricos, combinados com a falta ou a ineficiência de drenagem superficial, além de outros erros e inadequações que podem levar à redução da vida útil do pavimento. Entre tais erros e inadequações que podem levar à essa redução estão: erros de projeto; erros ou inadequações na seleção, na dosagem ou na produção de materiais; erros ou inadequações construtivas; erros ou inadequações nas alternativas de conservação e manutenção (Cavalcante et al., 2012; Bernucci et al., 2008).

O recorrente surgimento, na maioria dos casos precoce, de patologias nos pavimentos da cidade de Formosa/GO evidencia a falta ou a ineficiência de um sistema de gerência de pavimentos, bem como os insatisfatórios investimentos no setor, o que reflete a má

elaboração de projetos, a má execução dos mesmos e a falta ou ineficiência de manutenção dos pavimentos existentes.

Tendo em vista o estado em que se encontram os pavimentos das vias da cidade de Formosa/GO – com defeitos generalizados com correções prévias em áreas localizadas – e baseando-se no Manual de Restauração de Pavimentos do DNIT (2006b), a solução proposta para tais problemas é o recapeamento com correções prévias, que trata-se não apenas de correções locais em cada patologia existente na via, mas também da aplicação de uma nova camada de material betuminoso sobre toda a superfície existente do pavimento, uma vez que esta não é mais capaz de absorver, resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego. Sugere-se, ainda, um estudo aprofundado acerca do solo de fundação dos pavimentos da cidade, bem como dos materiais e métodos empregados na construção de tais estruturas.

Os valores de serventia encontrados para os trechos estudados variaram de ruim a péssimo, o que reflete a precária situação das ruas e avenidas da cidade, sobretudo no bairro central, e a posiciona na média do estado, segundo CNT (2014). O trabalho de mapeamento de defeitos e a existência de um sistema de gerência de pavimentos é de suma importância para a identificação dos problemas e aplicação da manutenção corretiva. É sugerido, para trabalhos futuros, a Avaliação Objetiva dos trechos avaliados, segundo a norma DNIT (2003b), que leva em consideração, por exemplo, a contagem e classificação de ocorrências aparentes e da medida das deformações permanentes nas trilhas de roda.

REFERENCIAS

- BERNUCCI, L. B. et al. (2008). *Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros*. PETROBRAS: ABEDA, Rio de Janeiro.
- CAVALCANTE, D. G. et al. (2012). *Levantamento Visual das Patologias na Cidade de Manaus-Am*. Teoria e Prática na Engenharia Civil, n.19, p.77-87.
- CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE, CNT. (2014). *Pesquisa CNT de Rodovias 2014: Relatório Gerencial*. Disponível em: <<http://pesquisarodovias.cnt.org.br/Paginas/relGeral.aspx>> Acesso em: 30/06/2015.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. (2003a). *DNIT 005/2003: Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos - Terminologia*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. (2003b). *DNIT 006/2003: Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. (2003c). *DNIT 009/2003: Avaliação subjetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos - Procedimento*. Rio de Janeiro.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. (2006a). *Manual de pavimentação*. Rio de Janeiro.

- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DNIT. (2006b). *Manual de restauração de pavimentos asfálticos*. Rio de Janeiro.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, IBGE. (2015). *Cidades: Formosa/GO*. Disponível em: < <http://cod.ibge.gov.br/237L7>> Acesso em: 08/07/2015.
- PELISSON, N. D. et al. (2015). *Avaliação de desempenho pelo MEPDG: o efeito da variação de espessuras de pavimentos flexíveis*. The Journal of Transport Literature, p. 20-24.
- QUIRINO, M. E. P. (2013). *Recuperação de Pavimentos Flexíveis em Áreas de Taxiamento de Aeronaves: um estudo de caso da pista FOX-2 do Aeroporto Internacional Tancredo Neves – MG*. Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais.
- SENÇO, W. (2007). *Manual de técnicas de pavimentação*: volume 1. 2 ed. Pini, São Paulo.
- SILVA, P. F. A. (2005). *Manual de patologia e manutenção de pavimentos*. 2 ed. Pini, São Paulo.

54 Mezclas asfálticas tibias: una alternativa eficaz para la construcción de pavimentos medioambientalmente amigables

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón

Vanessa Senior Arrieta

Deisy Johana Posada

Universidad Nacional de Colombia, Colombia

RESUMEN

Las mezclas asfálticas tibias surgen a raíz de la necesidad de salvaguardar el planeta y mitigar las acciones que contribuyen a su contaminación ambiental; razones que han impulsado a la industria y a los investigadores del área a reducir el consumo energético en los proyectos de construcción de infraestructura vial. Su principal característica radica en la reducción de las temperaturas de producción y compactación empleadas, en un rango de 25 °C a 55 °C en comparación con las mezclas asfálticas convencionales (de producción en caliente). Esto se logra con la inclusión de aditivos químicos u orgánicos, o procesos especiales que mejoran la viscosidad del ligante asfáltico. Posee los mismos materiales que componen una mezcla asfáltica convencional o HMA (“Hot mix asphalt”), como se le conoce habitualmente por su siglas en inglés: cemento asfáltico, materiales pétreos y llenante mineral; que proporcionados en forma adecuada, satisfacen unas propiedades particulares relacionadas con la estabilidad y el porcentaje de vacíos de la mezcla.

En este artículo se emplea una metodología experimental, se presentan los resultados de la caracterización física y mecánica de una mezcla asfáltica tibia, que se compone de cemento asfáltico de penetración 60-70 x 10⁻¹ mm, modificado con aceite crudo de palma y materiales pétreos de la región del Valle de Aburrá, en aras de lograr una buena trabajabilidad del ligante modificado a una menor temperatura, sin que esto afecte en forma negativa su desempeño.

Palabras clave: Mezclas asfálticas tibias, asfaltos modificados, aceite crudo de palma, viscosidad, mezclas asfálticas en caliente.

1. INTRODUCCIÓN

Si bien es cierto que la construcción de carreteras en un territorio genera un impacto positivo en el desarrollo socioeconómico de la región, esta actividad trae consigo consecuencias ambientales negativas ligadas no sólo a la intervención antrópica de los ecosistemas, sino también a la contaminación atmosférica por causa de la emisión de gases de efecto invernadero en el proceso de producción de mezclas asfálticas en caliente; las cuales son ampliamente usadas para la construcción de carpetas de rodadura asfálticas.

La Conferencia de las Naciones Unidas sobre el medio ambiente y el desarrollo sostenible, que se celebró en Río de Janeiro en 1992, marcó el inicio de la conciencia universal acerca del cambio climático, de acuerdo con Dorchie (2008). Sectores tales como la industria, la agricultura y el transporte son acusados de ser los principales contribuyentes. Esta toma de conciencia se formalizó en 1997 por el Protocolo de Kyoto que ofreció en particular, un compromiso de los Estados firmantes a llevar las tasas de emisión de gases a los niveles del año 1990. Por su parte, Rubio *et al.* (2012) afirma que una de las principales fuentes de polución derivada de las industrias relacionadas con la infraestructura del transporte (*i.e.* construcción de vías) reside precisamente en la producción, colocación y mantenimiento de las mezclas asfálticas.

Muchas han sido las tecnologías que se han venido implementando desde 1970, según afirma Goh y You (2013) y Zettler (2006), para disminuir las temperaturas de calentamiento del cemento asfáltico y los agregados pétreos; sin que esto comprometa su desempeño. De allí precisamente, de acuerdo con Brown (2008), toman su nombre las mezclas asfálticas tibias; aquéllas que se producen a una temperatura inferior si se las compara con las mezclas asfálticas convencionales.

Según D'Angelo *et al.* (2008), adiciones de variados polímeros y ceras en pequeñas proporciones y amidas de ácidos grasos como el licomont según Senior (2013), que en la mayoría de los casos no superan el 4 % con respecto a la masa del ligante y procesos de espumado; se realizan e investigan con frecuencia por los diferentes departamentos de transporte de Estados Unidos, agencias de transporte latinoamericanas y países europeos para determinar el porcentaje de reducción en las temperaturas de producción y compactación de mezclas asfálticas. Muchas de estas investigaciones con resultados altamente satisfactorios.

El bioasfalto desarrollado en Colombia por Lopera (2011), es un asfalto modificado con aceite crudo de palma, empleado tradicionalmente como materia prima en la producción de biodiesel. Sin embargo, genera una serie de beneficios en materia ambiental si su uso se extiende hacia la construcción sostenible de superficies de rodadura de los pavimentos flexibles.

Conocidos de antemano los beneficios ambientales que generan la producción y colocación de mezclas asfálticas tibias en una época en la que el calentamiento global aumenta en su curva de comportamiento, es indispensable impactar con acciones de mejora aquellos sectores que más contribuyen al deterioro ambiental. Razón por la cual, se planteó el proyecto de investigación consistente en la caracterización física y mecánica de una mezcla asfáltica tibia elaborada con materiales pétreos colombianos y asfalto de penetración 60-70 x 10⁻¹ mm., modificado con aceite crudo de palma como agente mejorador de la viscosidad, que brindará la función de rodadura estable y confortable en una estructura de pavimento flexible.

2. MEZCLAS ASFÁLTICAS TIBIAS (WMA – “Warm mix asphalt”)

Una mezcla asfáltica tibia puede definirse como la combinación proporcionada de agregados pétreos, llenante mineral y ligante asfáltico cuyo proceso de producción se encuentra en un rango de temperaturas de 100 °C a 135 °C (*i.e.* rango de temperatura necesario y suficiente para secar los agregados y mezclar con el cemento asfáltico), en virtud del mejoramiento de la viscosidad del asfalto bien sea por adición de polímeros, grasas y ceras o por procesos de espumado del mismo. De acuerdo con Davidson et al. (2006), las diferentes tecnologías y procesos desarrollados para lograr la reducción de las temperaturas de producción y compactación de las mezclas asfálticas convencionales, es lo que se ha denominado WMA (“Warm mix asphalt”). Sin embargo, esta reducción de temperatura no desmejora las propiedades mecánicas y dinámicas de la mezcla, es más, proporciona beneficios adicionales como reducción de costos de producción, emisión de gases de efecto invernadero y consumo energético, según afirma Reyes et al. (2014).

Las mezclas asfálticas tibias, presentan una reducción importante en cuanto a la emisión de gases nocivos, con respecto a las mezclas asfálticas en caliente. Este es quizá, el logro más significativo en aras de contribuir con una atmósfera más libre de gases efecto invernadero. Y es que de acuerdo con Capitão, et al. (2012), el hecho de no necesitar temperaturas superiores a los 140 °C para las operaciones de secado y calentamiento de los agregados pétreos y asfálticos y aun así, no aminorar las propiedades de las mezclas asfálticas producidas; es una ganancia significativa para la sociedad y el medio ambiente. Así por ejemplo, con las mezclas asfálticas tibias se pueden lograr reducciones entre el 20 % y 35 % de consumo de combustible según D’Angelo et al. (2008), entre el 25 % y 55 % en las partículas de polvo, 30 % y 40 % en las emisiones de gas carbónico, entre 60 % y 70 % en las de óxido de nitrógeno, 50 % en compuestos orgánicos volátiles y 35 % en las emisiones de dióxido de azufre de acuerdo con lo expuesto por Lopera y Córdoba (2013).

2.1 Antecedentes

En el año 1956, el Profesor Ladis Csanyi de la Universidad del estado de Iowa, advirtió el potencial del asfalto espumado; el cual permitía emplear temperaturas más bajas en la preparación de la mezcla asfáltica. Desde entonces esta tecnología es aplicada exitosamente en muchos países europeos y americanos, según manifiesta Button *et al.* (2007).

Posteriormente, en 1968 Mobil Oil Australia adquirió los derechos de patente de esta investigación y modificó el proceso original inyectando agua fría en lugar de vapor de agua en el asfalto caliente, según Rubio y Martínez (2011). Unos años más tarde, en 1997, *Sasobit*[®] comenzó a ser comercializado en Europa como un aditivo para la compactación de mezclas asfálticas tibias. La tecnología, más tarde se convirtió en el proceso de WMA, según Hurley y Prowell (2005).

Así como *Sasobit*[®], otros productos sintéticos y procesos químicos que impactaron directamente en la viscosidad del ligante asfáltico y presentaron reducciones en las temperaturas de producción tales como: *Aspha-min*[®], *Advera*[®], *Hypertherm* y *Low-energy asphalt (LEA)*[®], *Evotherm*[®], comenzaron a ser ampliamente utilizados e investigados con casos de estudio particulares en diferentes estados en Estados Unidos y países Europeos, según manifiesta Manolis et al. (2008).

Posteriormente, se introdujo un nuevo proceso que implica la elaboración de mezclas tibias a partir del tratamiento con asfalto espumado. Se exploraron los conceptos y posibles beneficios de calentamiento de una amplia variedad de agregados a temperaturas por encima de la temperatura ambiente pero por debajo de 100 °C antes de la aplicación del asfalto espumado. De acuerdo con Button et al. (2007), ellos evaluaron aspectos tales como el precalentamiento de agregados, el recubrimiento mejorado de las partículas de agregado, la cohesión de la mezcla, resistencia a la tracción, y compactación.

Investigaciones recientes con resultados satisfactorios, de acuerdo con Tao y Mallick (2009) y casos de aplicación en el estado de Maryland, EE.UU en 2005; revelan que la tecnología *WMA* puede incluso combinarse con mezcla asfáltica reciclada (*RAP* – “reclaimed asphalt pavement”) empleando *Sasobit*[®] como agente mejorador de la viscosidad y trabajabilidad del cemento asfáltico empleado, sin aminorar el desempeño de la mezcla producida.

Sumado al auge que ha tenido la incorporación de otras tecnologías a la Ingeniería de pavimentos, el estudio desarrollado por Carvajal-Muñoz et al. (2015), permitió determinar características de la estructura interna de mezclas asfálticas tibias cuyo asfalto fue modificado con aditivos químicos y orgánicos, empleando técnicas de procesamiento de imágenes como la tomografía computarizada cuyo uso se ha venido popularizando en disciplinas tales como la petrología, sedimentología, geotecnia, mecánica de fluidos y paleontología según Cnudde et al. (2006); no encontrando diferencias significativas en cuanto al tamaño y distribución de los espacios vacíos generados por las mezclas asfálticas tibias con modificación de asfaltos y mezclas asfálticas convencionales.

2.2 Clasificación de las mezclas tibias

Existen diversos tipos de tecnología existentes para producir las mezclas asfálticas tibias. A pesar de que en un principio cada uno de los productos tenía sus características particulares, diferentes rasgos comunes pueden ser identificados entre algunos de ellos, lo cual permite establecer una clasificación más detallada a partir del principio de funcionamiento en el que se basan.

De acuerdo con Miró (2006), entre los beneficios potenciales de las *WMA*, es posible citar:

- Las temperaturas de producción y colocación son significativamente menores.
- El envejecimiento del asfalto por oxidación y calentamiento es menor durante las operaciones de mezclado y colocación, lo que mejora la longevidad del pavimento.

- La segregación térmica es reducida, así como también el consumo de combustible empleado, esto conlleva a un menor consumo de energía.
- Disminución de la producción de polvo, de las emisiones de gases de efecto invernadero como CO₂ (dióxido de carbono), NO_x (óxido de nitrógeno), CH₄ (metano), O (ozono) y CFC (clorofluorocarbonos) y olores en la planta, durante las etapas de mezclado y colocación.
- Los plazos para la colocación y compactación de la mezcla pueden ser más largos, es decir, la mezcla tiene mayor trabajabilidad en un tiempo más prolongado.
- Permite mayores distancias de acarreo de la mezcla debido a la menor diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la mezcla.
- Mejora de las condiciones de trabajo de la planta y el equipo de pavimentación.
- Apertura más rápida de tráfico para algunos productos WMA (un factor particularmente importante para los aeropuertos).

2.2.1 Procesos de espumado

El principio de funcionamiento de este tipo de tecnología WMA se basa en el uso de pequeñas cantidades de agua que pueden ser inyectadas directamente en el asfalto caliente o también añadidas con los agregados a la mezcla. Cuando el agua se mezcla o entra en contacto con el betún o asfalto caliente, las altas temperaturas de éste provocan su evaporación y el vapor queda atrapado dentro de la matriz del asfalto. De este modo, se genera un volumen considerable de vapor, que se encarga de incrementar de manera temporal el volumen del betún y disminuye la viscosidad del mismo.

2.2.2 Aditivos orgánicos

Esta tecnología se basa en la adición de distintos tipos de cera por encima del punto de fusión al cemento asfáltico, lo cual produce generalmente un decrecimiento en su viscosidad. Durante el periodo de enfriamiento de la mezcla extendida, los aditivos fundidos se solidifican en partículas microscópicas y se distribuyen uniformemente, lo que incrementa la dureza del ligante, análogo a lo que hacen los materiales reforzados con fibras. La dosificación habitual es entre 2 % y 4 % de cera respecto al total de la masa del asfalto. Los aditivos orgánicos suelen conseguir una reducción de temperatura entre 20 °C y 30 °C, mientras que también mejoran la resistencia a la deformación de los asfaltos tratados con estos productos, según informa D'Angelo et al. (2008).

2.2.3 Aditivos químicos

Los aditivos químicos por lo general incluyen una combinación de agentes emulsificantes, surfactantes, polímeros y aditivos para mejorar la trabajabilidad de la mezcla. Los aditivos químicos no dependen de procesos de espumado o de reducción de viscosidad. La proporción de estos aditivos a la mezcla no es estandarizada y depende directamente del producto que se desea utilizar. Son los más recientes en el desarrollo de mezclas asfálticas tibias con resultados prometedores, que hacen pensar en ésta, como una fuerte alternativa para el desarrollo de las mezclas tibias.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada para el desarrollo de esta investigación, inicia con una componente de experimentación por medio de ensayos de laboratorio, con los cuales se determinan las propiedades de los materiales empleados para la caracterización de la mezcla asfáltica tibia. Uno de los ensayos más importantes es el de viscosidad, con el cual se establece el comportamiento reológico del asfalto.

El proceso de mezclado entre el cemento asfáltico y el aceite crudo de palma no tuvo mayores dificultades, por ser materiales compatibles. El proceso de modificación del asfalto se realizó elevando la temperatura del aceite crudo de palma por encima de su punto de fusión (40 °C), alcanzando una temperatura óptima de mezclado de 100 °C en todos los especímenes de prueba ensayados. Así, se garantizaron la homogeneidad del proceso y de la mezcla, una buena fluidez del asfalto y una compatibilidad entre la temperatura del aceite y del asfalto.

Todos los procedimientos para los ensayos de laboratorio que caracterizan el comportamiento físico y mecánico de los agregados pétreos, están sujetos a las recomendaciones y especificaciones técnicas de la normativa Colombiana expedida por el Instituto Nacional de Vías (2007). Los resultados de dicho proceso de caracterización se presentan en el siguiente capítulo.

Se realiza la modificación del cemento asfáltico, la cual consiste en establecer el porcentaje óptimo de aceite de palma que se adiciona al asfalto. De acuerdo con la revisión bibliográfica para modificación de asfaltos con aditivos orgánicos, se establecen los porcentajes de adición de aceite con respecto a la masa del ligante, que para el caso particular, corresponden al 1 %, 2 %, 3 % y 4 %. Con cada una de estas mezclas se determina el comportamiento visco-elástico del asfalto utilizando el viscosímetro rotacional de Brookfield. Posteriormente se realizan los ensayos de caracterización del cemento asfáltico con la adición de aceite en los porcentajes utilizados.

Con el asfalto ya modificado (mejor comportamiento reológico de las proporciones 1, 2, 3 y 4 % con respecto a la masa del ligante), se procede a determinar el contenido óptimo de éste para obtener una mezcla asfáltica tibia, empleando la metodología Marshall. Se utilizará una mezcla con granulometría continua o densa tipo 2 (TM 19 mm), correspondiente a una mezcla empleada como carpeta de rodadura para pavimentos flexibles. Se realizan briquetas de ensayo para determinar el comportamiento mecánico de la mezcla asfáltica tibia, a través de la medición de propiedades tales como: estabilidad, porcentaje de vacíos, densidad y flujo.

Tabla 1. Caracterización de los agregados pétreos

| Descripción del ensayo | Norma I.N.V. | Resultados | Especificación INVÍAS |
|---------------------------------------|--------------|--------------------------|-----------------------------|
| Desgaste en la máquina de los ángeles | E-218 | 18.84% | 25 % máximo |
| Pérdida en sulfato de magnesio | E-220 | Agregado grueso = 4.42 % | 18 % máximo |
| | | Agregado fino = 6.22% | |
| Desgaste en aparato micro - deval | E-238 | 9.3% | 20 % máximo |
| Partículas con una cara fracturada | E-227 | 69.05% | 85 % mínimo |
| Índice de plasticidad | E-126 | N.P | N.P |
| Equivalente de arena | E-133 | 88% | 50 % mínimo |
| Limpieza superficial del agregado | E-237 | 0.02% | 0.5 % máximo |
| Peso unitario del llenante en tolueno | E-225 | 0.71 gr/cm ³ | 0.5 – 0.8 g/cm ³ |

4. RESULTADOS

4.1 Caracterización físico-mecánica de los agregados pétreos

En la Tabla 1 se presentan los ensayos realizados y sus correspondientes resultados, el procedimiento de ensayo empleado y los requisitos de cumplimiento para una MDC-2 (mezcla de gradación densa en caliente tipo 2), para un nivel de tránsito NT3.

4.2 Caracterización del cemento asfáltico modificado con aceite crudo de palma

En la Figura 1 se muestra la curva reológica obtenida para el asfalto base (cemento asfáltico sin modificar o aceite al 0.0 %) y para el asfalto con los diferentes contenidos de aceite. Adicionalmente se muestran los rangos de compactación y mezclado; el primero corresponde a la temperatura en la que el asfalto debe tener una viscosidad de 280 ± 30 cP., y el segundo corresponde a la temperatura a la cual el asfalto tiene una viscosidad de 170 ± 20 cP, de acuerdo con ASTM D2493 (2000).

Adicionalmente se observa que, independientemente de la cantidad de aceite de palma adicionado, la magnitud en la cual se reduce la viscosidad disminuye a medida que aumenta la temperatura. El cambio en la viscosidad del ligante es el principio más importante que hace posible la producción de mezclas asfálticas a menores temperaturas con una correcta envuelta y sin pérdida de trabajabilidad a la hora de la extensión de la mezcla. La relación temperatura-viscosidad del ligante es, por lo tanto, determinante a la hora de decidir los

rangos de temperatura a los cuales producir las mezclas asfálticas tibias.

La curva reológica del asfalto con adición de aceite crudo de palma se obtiene por medio del ensayo de viscosidad de Brookfield. El ensayo consiste en rotar un eje en una muestra de asfalto a una temperatura determinada, midiendo el torque requerido para mantener una velocidad de rotación constante. A partir del mencionado torque, el aparato indica directamente la viscosidad cinemática de la muestra.

A pesar de mostrar un aparente mejor comportamiento en cuanto a la reducción de temperaturas de mezclado y compactación, el asfalto modificado con 4 % de adición de aceite crudo de palma se descartó debido a la baja viscosidad que se presenta con esta dosificación, condición que no satisface la debida envuelta de los agregados y hace que la mezcla sea menos rígida y por consiguiente más susceptible a las deformaciones, lo cual puede redundar en el detrimento del desempeño en servicio de la mezcla asfáltica tibia. Por esta razón no se presentan sus resultados. Adicionalmente la reducción en las temperaturas de trabajo que se presentan con esta dosificación no fue significativa.

En la Tabla 2 se muestran las temperaturas de trabajo (mezclado y compactación) para las diferentes dosificaciones de aceite crudo de palma al asfalto, las cuales fueron obtenidas empleando la curva reológica del asfalto.

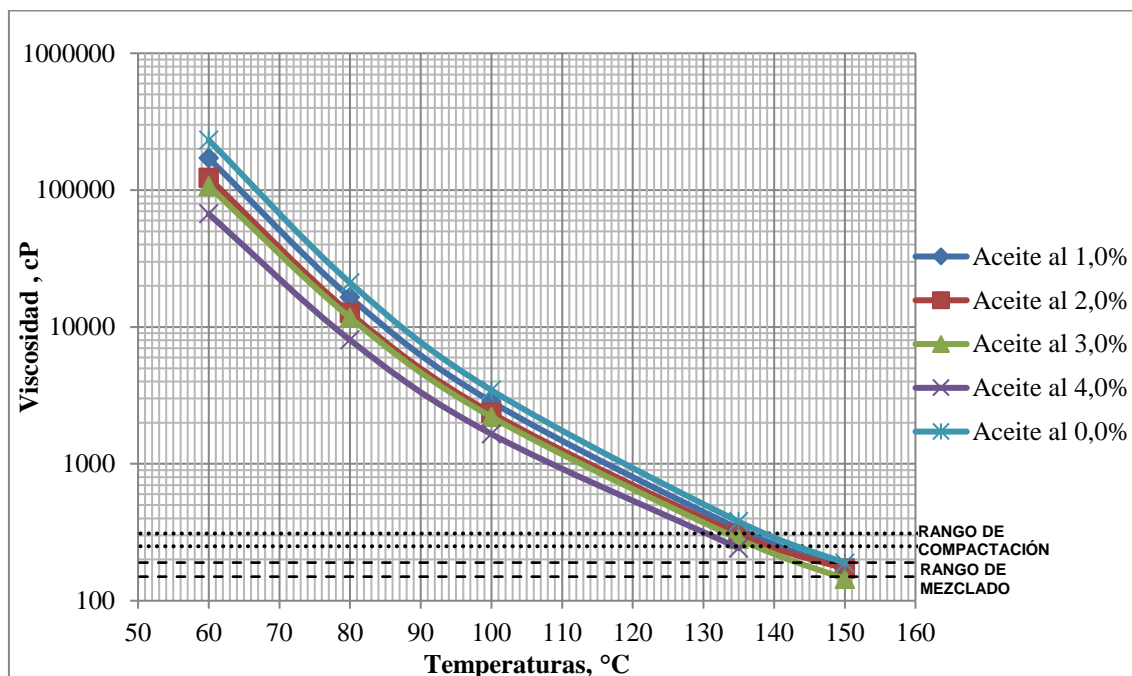


Figura 1. Curva reológica del cemento asfáltico normalizado con diferentes proporciones de adición de aceite crudo de palma

Tabla 2. Variación en las temperaturas de trabajo. Mezcla asfalto y aceite

| Dosificación | Temperatura mezcla (°C) | | Promedio mezcla (°C) | Temperatura compactación (°C) | | Promedio compactación (°C) |
|---------------------|-------------------------|------------|----------------------|-------------------------------|------------|----------------------------|
| | | | | | | |
| Aceite al 4% | 140 | 144 | 142 | 130 | 134 | 132 |
| Aceite al 3% | 143 | 149 | 146 | 133 | 137 | 135 |
| Aceite al 2% | 147 | 152 | 150 | 135 | 139 | 137 |
| Aceite al 1% | 146 | 151 | 149 | 136 | 140 | 138 |
| Aceite al 0% | 150 | 156 | 153 | 138 | 143 | 141 |

De los resultados obtenidos de la caracterización del cemento asfáltico modificado, se escoge la dosificación del 3 % de adición de aceite crudo de palma, dado que es la que presenta menor viscosidad Brookfield a menor temperatura y satisface la envuelta con los agregados pétreos. La temperatura de mezclado, de acuerdo con los resultados presentados, para una dosificación de aceite de crudo de palma al 3 %, es de 146 °C, y la temperatura de compactación, de acuerdo con los mismos criterios, es de 135 °C.

4.3 Caracterización de la mezcla asfáltica tibia diseñada

Una vez se realizó la caracterización de los materiales pétreos y asfálticos, se determinó el porcentaje óptimo de asfalto modificado con el empleo de la metodología Marshall. Las briquetas se elaboraron con la granulometría MDC-2, variando el contenido de cemento asfáltico en incrementos de 0.5 % en masa en el rango delimitado por la normatividad empleada, iniciando en 4.5 % y culminando en 6.0 %.

Se prepararon 4 grupos de 3 briquetas para la mezcla de agregados, con diferente contenido de asfalto, los porcentajes de asfalto empleados fueron 4.5 %, 5 %, 5.5 % y 6 %. Las briquetas fueron compactadas con un martillo de masa 10 lb con terminación circular del mismo diámetro del molde de los especímenes y aplicando 75 golpes por cara; correspondiente con el nivel de tránsito evaluado. Considerando los resultados obtenidos para el asfalto modificado con aceite crudo de palma, las briquetas se mezclaron a una temperatura promedio de 146 °C y fueron compactadas a una temperatura promedio de 135 °C.

En la Tabla 3 se presentan los resultados del Análisis Marshall incluyendo los resultados para las propiedades: estabilidad Marshall, flujo y porcentaje de vacíos. Asimismo, las especificaciones para el diseño de una mezcla asfáltica tipo MDC-2 por el método Marshall; las cuales fueron utilizadas para llegar al contenido óptimo de asfalto.

Tabla 3. Resultados para estabilidad y flujo - Método Marshall

| Contenido de asfalto | 4.5 % | 5.0 % | 5.5 % | 6.0 % | Especificación |
|---------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|
| Estabilidad (kgf) | 1238.2 | 1012 | 1054.2 | 831 | 900 |
| Flujo (mm) | 2.4 | 2.6 | 3.4 | 3.7 | 2 - 3.5 |
| Vacíos con aire Va (%) | 6.3 | 4.9 | 4 | 3.4 | 4 - 6 |
| Vacíos en los agregados minerales (%) | 13.9 | 13.8 | 14.1 | 14.8 | ≥15 |
| Vacíos lleno de asfalto (%) | 54.4 | 64.3 | 71.6 | 77.1 | 65 - 75 |
| Relación llenante/ Asfalto efectivo | 1.95 | 1.68 | 1.48 | 1.31 | 0.8 - 1.2 |

De acuerdo con los resultados obtenidos y las especificaciones de diseño para una mezcla asfáltica en caliente tipo MDC-2 con especificaciones (Instituto Nacional de Vías 2013), se seleccionó la siguiente fórmula de trabajo:

| | |
|-------------------------------------|------------------------|
| Contenido óptimo de asfalto: | 5.5 % |
| Densidad: | 2.48 g/cm ³ |
| Estabilidad Marshall: | 1054.2 kgf |
| Flujo: | 3.4 mm |
| Vacíos con aire: | 4.0 % |
| Vacíos en los agregados minerales: | 14.1 % |
| % de vacíos llenos de asfalto: | 71.6 |
| Relación Llenante/ Asfalto efectivo | 1.48 |

5. CONCLUSIONES Y DISCUSIÓN

Cuando se busca realizar modificaciones o adiciones al asfalto, debe considerarse la gran variabilidad que éstos tienen; aunque presenten una consistencia equivalente medida en el ensayo de penetración y provengan de la misma planta de producción. Esto depende tanto de la naturaleza del pozo de extracción como del proceso de destilación del petróleo y posterior normalización del asfalto. Debido a lo anterior, no es posible determinar un único comportamiento del asfalto con los distintos porcentajes de adición de aceite de palma, pero si es posible establecer una tendencia en las distintas curvas reológicas del asfalto con los porcentajes en los cuales se realizó la adición.

Con la adición de un 3 % de aceite crudo de palma al asfalto normalizado 60-70 se logró obtener una reducción de 7 °C y de 6 °C con respecto a las temperaturas de mezclado y compactación del asfalto base, respectivamente. Sin embargo, esta reducción, no fue la necesaria para considerarla como una mezcla tibia. Resultados similares a los reportados por Reyes et al. (2014) al usar cera cruda de caña como aditivo.

De los diferentes contenidos de asfalto utilizados en el método Marshall, el de 5.5% es seleccionado como el óptimo de asfalto, ya que garantiza condiciones de estabilidad y flujo apropiadas de acuerdo con las especificaciones, siendo el contenido que satisface el mayor número de especificaciones en comparación con los otros tres 4.5%, 5.0% y 6.0%.

El comportamiento del asfalto con adición de aceite crudo de palma, muestra un comportamiento similar independiente del asfalto y de la cantidad de aceite adicionado, este presenta una mayor disminución de viscosidad a bajas temperaturas mientras que, a mayores temperaturas tiende a estar muy cerca del valor inicial de viscosidad del asfalto sin agente modificador. Otras propiedades tales como consistencia y punto de ablandamiento sufren variaciones con la adición del aceite crudo de palma.

Los resultados de esta investigación crean la necesidad y la motivación de investigaciones futuras que permitan encontrar otras alternativas que posibiliten la modificación del asfalto y disminución del consumo energético y con ella, las emisiones de gases de efecto invernadero de las mezclas asfálticas en caliente, de forma que estas sean técnica y económicamente viables para los grandes proyectos de infraestructura vial que requiere el país.

AGRADECIMIENTOS

Para el desarrollo del proyecto, se utilizaron materiales pétreos provenientes de la planta de agregados y asfaltos Procopal ubicada en Girardota – Antioquia. El cemento asfáltico empleado para la elaboración de las briquetas proviene de MPI (Manufacturas y procesos industriales Ltda.), y corresponde al de penetración 60-70 x 10⁻¹ mm normalizado. El aceite crudo de palma fue donado por la empresa Dismaprim Ltda.

REFERENCIAS

- ASTM D2493. (2000). *Standard Practice for Viscosity-Temperature Chart for Asphalts*. Annual Book of American Society for Testing materials ASTM Standards 44(0):0–5.
- BROWN, D. (2008). *Warm Mix: The Lights Are Green*. Transportation Research Board 13(1). Retrieved (<http://trid.trb.org/view.aspx?id=849772>).
- BUTTON, J., ESTAKHRI, C. Y WIMSATT A. (2007). *A Synthesis of Warm-Mix Asphalt*. Retrieved (<http://tti.tamu.edu/documents/0-5597-1.pdf>).
- CAPITÃO, S. D., PICADO-SANTOS, L. G. Y MARTINHO, F. (2012). *Pavement Engineering Materials: Review on the Use of Warm-Mix Asphalt*. Construction and Building Materials in Elsevier 36:1016–24.
- CARVAJAL-MUÑOZ, J., ÁLVAREZ, A. y REYES-ORTIZ O. (2015). *Evaluación de la estructura interna de mezclas asfálticas tibias (Mat) mediante procesamiento y análisis de imágenes de Rayos X*. XIX Simposio Colombiano sobre Ingeniería de Pavimentos, Bogotá (October).

- CNUUDE, V. et al. (2006). *Recent Progress in X-Ray CT as a Geosciences Tool*. Applied Geochemistry in Elsevier 21(5):826–32.
- D'ANGELO, J. et al. 2008. *Warm-Mix Asphalt: European Practice*. Washington, D.C.
- DAVIDSON, J., TIGHE, S. Y CROTEAU, J.M. (2006). *Paving the way to environmentally friendly Pavements through Innovative Solutions*. Pp. 97–121 in Canadian Technical Asphalt Association. Aurora, Ontario.
- DORCHIES, P.T. (2008). *Environmental Road of the Future: Analysis of energy consumption and Greenhouse Gas Emissions*. P. 19 in 2008 Annual Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada - Transportation: A Key to a Sustainable Future. Toronto, Canadá. Retrieved (http://conf.tac-atc.ca/en...lish/table_of_contents.htm).
- GOH, S. Y YOU, Z. (2013). *Mechanical Properties of Porous Asphalt Pavement Materials with Warm Mix Asphalt and RAP*. Journal of transportation Engineering in American Society of Civil Engineers (January):61–69. Retrieved ([http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/\(ASCE\)TE.1943-5436.0000613](http://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/(ASCE)TE.1943-5436.0000613)).
- HURLEY, G. C. Y PROWELL, B. (2005). *Evaluation of Sasobit for Use in Warm Mix Asphalt*. National Center for Asphalt Technology - Report 05-06 (June):32.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (2007). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras Y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras. Penetración de Los Materiales Asfálticos INV E-706*. Instituto Nacional de Vías 1–8.
- INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS (2013). *Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras Y Normas de Ensayo Para Materiales de Carreteras. Artículo 453: Mezcla Drenante*. Bogotá, D.C.
- LOPERA, C. (2011). *Diseño y producción de mezclas asfálticas tibias, a partir de la mezcla de asfalto y aceite curdo de palma (elais guineensis)*. Trabajo de Grado Para Optar Al Título de Magíster En Ingeniería: Universidad Nacional de Colombia.
- LOPERA, C. Y CÓRDOBA, J. (2013). *Diseño de Mezcla Asfáltica Tibia a Partir de La Mezcla de Asfalto Y Aceite Crudo de Palma*. DYNA (Colombia) 80(179):99–108. Retrieved (<http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84879185459&partnerID=tZOtx3y1>).
- MANOLIS, S., DECOO, T., LUM, P. Y GRECO, M. (2008). *Cold Weather Paving Using Warm Mix Asphalt Technology*. En Warm Asphalt as a sustainable strategy for pavements session of the 2008 Annual Conference of the Transportation Association of Canada. Toronto, Canada.
- MIRÓ, R. (2006). *Nuevas Mezclas Para Capas de Rodadura Y Su Influencia En El Confort (ruido) y la Seguridad*. Centro Politécnico Superior - Universidad Politécnica de Cataluña.
- REYES, O., FUENTES, L. Y ALVAREZ, A. (2014). *Mechanical Response of Asphalt Mixtures Modified with Natural Wax*. Advanced Characterization of asphalt and concrete materials for ASCE 2014 58–66.
- RUBIO, C. Y MARTÍNEZ, G. (2011). *Investigación de Nuevas Mezclas de Baja Energía Para La Rehabilitación Superficial*. Universidad de Granada. Gobierno de España - Ministerio de Ciencia e Innovación 1–74. Retrieved (<http://labic.ugr.es/inmbers.html>).

- RUBIO, C., MARTÍNEZ, G., BAENA, L. Y MORENO, F. (2012). *Warm Mix Asphalt: An Overview*. Journal of Cleaner Production in Elsevier 24:76–84. Retrieved (<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.053>).
- SENIOR, V. (2013). *Diseño de mezclas asfálticas drenantes tibias a partir de la mezcla de cemento asfáltico ac 60-70 con licomont bs-100 para diferentes niveles de precipitación*. Proyecto de Grado Para Optar Al Título de Magíster En Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.
- TAO, M. Y MALLICK, R. (2009). *Effects of Warm-Mix Asphalt Additives on Workability and Mechanical Properties of Reclaimed Asphalt Pavement Material*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2126(-1):151–60.
- ZETTLER, R. (2006). *Warm Mix Stands up to Its Trials*. Transportation Research Board 76(2). Retrieved (<http://www.betterroads.com>).

55 Evaluación del desgaste por abrasión de una mezcla drenante con el uso de fibra acrílica como aditivo

Yee Wan Yung Vargas

Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta-Colombia

Jorge Eliécer Córdoba Maquilón

Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín-Colombia

Hugo Alexander Rondón Quintana

Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá-Colombia

RESUMEN

La presente investigación desarrolló mezclas drenantes en el laboratorio, con base en la normatividad del Instituto Nacional de Vías en Colombia (INVÍAS INV-13), con el aporte de material pétreo procesado de río, cemento asfáltico CA 60-70 (PG 64-22) y fibra acrílica como aditivo. La adición de la fibra se hizo por vía húmeda (sobre el cemento asfáltico) con porcentajes de 0.1%, 0.2% y 0.3%. Se evaluó la resistencia al desgaste por abrasión (en el ensayo del cántabro), la rigidez bajo carga monotónica (en el ensayo Marshall) y bajo carga cíclica (módulo resiliente) sobre mezclas drenantes sin aditivo (de control) y mezclas drenantes con aditivo. El ensayo cántabro se desarrolló sobre mezclas drenantes en seco y en húmedo, esta última después de haber sumergido los especímenes en agua durante 24 horas a 60°C. El uso de mezclas drenantes en los pavimentos reporta ventajas, como la capacidad de absorber el agua debido al mayor porcentaje de vacíos con aire (entre el 20% y el 25%) comparadas con las mezclas densas, ofrece disminución del ruido, mayor seguridad al paso de los vehículos y disminución del fenómeno de hidroplaneo de acuerdo a (Miró, 2006). El uso de fibra como modificador del cemento asfáltico en mezclas drenantes incrementó la viscosidad y rigidez en el cemento asfáltico, la resistencia bajo carga monotónica y la rigidez bajo carga cíclica de las mezclas.

Palabras clave: mezclas drenantes, fibra acrílica, desgaste por abrasión.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Hipótesis

El desgaste por abrasión en las mezclas asfálticas drenantes con el uso de fibra acrílica disminuye la resistencia bajo carga monotónica y la aumenta bajo carga cíclica, en comparación con las mezclas asfálticas drenantes convencionales (mezclas de control).

1.2 Planteamiento del problema

El uso de mezclas drenantes reporta ventajas en el funcionamiento de los pavimentos, ya que la composición de estas mezclas con respecto al porcentaje de vacíos dentro de ellas (entre 20% y 25%) aporta disminución en el ruido al pasar los vehículos, disminución en el fenómeno de hidroplaneo y mayor seguridad al paso de los vehículos; lo anterior comparado con las mezclas densas (Miró, 2006). El alto porcentaje de vacíos dentro de las mezclas drenantes permite el paso rápido del agua, afectando la adherencia entre el asfalto y el material pétreo; siendo la única forma de contrarrestar esta desventaja con el uso de modificadores dentro de las mezclas. Con el objeto de seguir dando aportes al campo de la investigación en este tema y de tratar de entender el comportamiento mecánico de estas mezclas drenantes modificadas con aditivos, se planteó el presente estudio con el uso de fibras. La modificación se hizo en húmedo sobre el cemento asfáltico y se comparó el comportamiento mecánico en las mezclas drenantes sin y con aditivo (fibra).

1.3 Antecedentes sobre mezclas drenantes

Las mezclas drenantes iniciaron su uso en el Reino Unido y posteriormente en los Estados Unidos de América cerca de los años 40, como tratamiento superficial para contrarrestar el deslizamiento de las aeronaves en las pistas, utilizando espesores de aproximadamente 2 cm. El objetivo además fue recuperar la textura de las capas de rodadura que se encontraban en estado muy liso, más no como capas drenantes para evacuar de forma rápida el agua de la superficie de rodadura. Con el tiempo se descubrió la capacidad de absorber el ruido, además de la capacidad para absorber las aguas de lluvia, lo que las llevó a ser las más usadas en Europa en los últimos 25 años. En Europa se introdujo a finales de los años 70 y en 1980 hizo su aparición en España (Roulet Mejías, 2009). En Colombia las mezclas drenantes son conocidas como MD y se encuentran en la normatividad del Instituto Nacional de Vías INVÍAS del año 2013, en el Artículo 453-13. Estas mezclas poseen un porcentaje de vacíos entre el 20%-25%, condición ideal para permitir la filtración del agua de lluvia en la capa y posteriormente poder ser evacuada hacia sus dispositivos laterales de drenaje en la vía. Son mezclas utilizadas como capas de rodadura asfálticas. Se diseñan por el método y ensayo del cántabro (ASTM D7064). El objeto del ensayo es evaluar la resistencia al desgaste por abrasión de briquetas tipo Marshall que se compactan a 50 golpes por cada cara, siguiendo especificaciones dadas en INV. E-760-13 (NLT 352/00). Con el propósito de mejorar el comportamiento de las mezclas drenantes ante el contacto con el agua, se modifican con aditivos que aumenten la adherencia entre el cemento asfáltico y el material pétreo que compone la mezcla. Modificar mezclas porosas con el propósito de mejorar sus propiedades mecánicas en vías sometidas a clima con temperatura alta y tráfico pesado ha sido recomendado ampliamente hace años.

1.4 Antecedentes sobre el asfalto-fibra en mezclas convencionales y drenantes

Existen varios tipos de fibras que han sido usadas en mezclas asfálticas, entre las cuales se encuentran: celulosa, mineral, fibras de polímeros sintéticos, fibras de origen vegetal usadas en zonas más limitadas, que se pueden derivar de fibras leñosas (yute, lino, paja y cáñamo),

hojas (sisal) y semillas, o pueden ser fibras de frutas (fibra de coco, algodón, palma); fibra de vidrio; fibra de desechos o reciclados. La adición de fibras acrílicas aumentan la resistencia, su deformación en rotura y su tenacidad, proporcionándole mejor comportamiento a la fisuración de servicio extrema, tráfico pesado y bajas temperaturas, de acuerdo a (Pérez et al., 1997). Algunos autores reportan que al usar fibras de poliéster existe disminución en la estabilidad de las mezclas debido a que la fibra no presenta resistencia significativa a cargas de compresión.

El uso de fibras sobre mezclas densas y abiertas ayuda a la mejor redistribución de esfuerzos; mayor cohesión y tenacidad gracias a su elasticidad, resultando mezclas más flexibles con una mayor resistencia al impacto y a los efectos abrasivos del tráfico de acuerdo con (Bringas y Rodríguez, 1999). Las mezclas drenantes con fibra celulosa y fibra mineral ofrecieron valores de resistencia al ahuellamiento y resistencia al daño por humedad similar, según Cooley et al., (2000). La adición de fibras de poliéster mejoró la resistencia a la tracción y disminuyó la susceptibilidad a la humedad, reportaron Anurag et al., (2002). En algunos otros estudios se observa un aumento del 74% en el valor de la estabilidad cuando las briquetas se compactan a 75 golpes empleando CA 60-70, cuando se emplea CA 80-100 aumenta la estabilidad un 33% y 16% a 50 y 75 golpes de compactación respectivamente, se reduce la deformación permanente del 15 a 25% a 50 golpes y 30% a 75 golpes, existe mayor resistencia a la fatiga y elevación del módulo dinámico a diferentes temperaturas en relación a las mezclas convencionales. González y García, (2004), reportan mejoramiento sobre mezclas bituminosas convencionales y drenantes al usar fibras acrílicas, una reducción entre el 30% y 35% al desgaste en la prueba del cántabro en seco, el uso de proporciones de fibra de 0.15% y 0.30% muestran en las mezclas mayor cohesión, disminución de la susceptibilidad térmica, disminución de las deformaciones plásticas, aumento de la resistencia al agrietamiento por fatiga y disminución de la fisuración; importante disminución de deformaciones plásticas; aumento de la resistencia al agrietamiento por fatiga, disminuyendo la fisuración; estabiliza la mezcla, permitiendo aumentar el asfalto sin riesgo de escurrimiento; mayor resistencia a la disgregación; mejor adhesividad; aumenta la resistencia al envejecimiento de las mezclas. Chen y Lin, (2005) reportan aumento en el refuerzo de las mezclas y resistencia a la tracción a medida que se aumenta la cantidad de fibras; el contenido óptimo de fibras depende del tipo, longitud y diámetro de las fibras. De acuerdo con Ramírez et al., (2005) al utilizar mezclas muy finas para el diseño de mezclas drenantes con el uso de fibras no se alcanza el nivel de vacíos de diseño. Reyes y Reyes, (2005) muestran un efecto positivo de las fibras de polipropileno en la modificación de la mezcla asfáltica, el módulo dinámico aumenta en un 45% promedio en un porcentaje de adición de 0.60%; la deformación permanente disminuye en un 27.6% para una adición de fibras de 0.60% y 48.8% para la adición de fibras de 0.75% respectivamente; el comportamiento de la mezcla asfáltica presenta mejoras en sus propiedades mecánicas y dinámicas con la adición de fibras, sobresaliendo el porcentaje de 0.60% de fibras por vía seca. Jiménez y Mrawira, (2007) reportan que la adición de la fibra celulosa a las mezclas mejoró la susceptibilidad a la deformación permanente en las mezclas drenantes y disminuyó

el índice de rigidez retenido. De acuerdo con Global Roads Management Consulting, (2008) el uso de fibra puede traducirse en una postergación de cinco años en la primera intervención de conservación periódica; se obtuvo una disminución del 40% en la profundidad de roderas, con reducciones en el agrietamiento y en el IRI; en cuanto a la reología del asfalto existe una disminución del índice de penetración en hasta un 45% y una mejora significativa en su clasificación por grado de desempeño PG hasta cuatro niveles; aumento en los valores de estabilidad Marshall; reducción del 45% de la susceptibilidad a la deformación permanente de la mezcla. De acuerdo con Ramzanpour y Mokhtari, (2011) la fibra tiene un efecto insignificante en la disminución de la deformación permanente de las mezclas asfálticas. Stempihar et al., (2011) muestran que las fibras mejoran la deformación permanente, el agrietamiento por fatiga y el craqueo térmico. Suchismita et al., (2011) reportan considerable aumento del módulo y fatiga de las mezclas con 0.3% de fibra. (Stempihar et al., 2011) muestran mezclas porosas con módulos dinámicos que mejoran respecto a las mezclas de control, especialmente a 100°F (34.8°C); mezclas porosas con fibras resisten el desarrollo y propagación de grietas comparadas con mezclas de control. Chen et al., (2013) encontraron menores desgastes en el ensayo del cántabro para mezclas con el uso de polímeros (fibras) e incremento en la durabilidad de las mezclas; el uso de fibras reduce el potencial de drenaje en las mezclas. De acuerdo con Shaopeng et al., (2016) las mezclas de asfalto modificado con fibra al 0.3% y 0.4% tienen un módulo dinámico más alto en comparación con las mezclas de control.

1.5 Objetivo del estudio

Evaluar el desgaste por abrasión (en el ensayo del cántabro), la rigidez bajo carga monótonica (en el ensayo Marshall) y bajo carga cíclica (módulo resiliente) sobre mezclas drenantes sin aditivo (de control) y mezclas drenantes modificadas por vía húmeda con fibra acrílica. Las mezclas drenantes fueron fabricadas con cemento asfáltico tipo CA 60-70, fibra acrílica y granulometría de acuerdo a las especificaciones dadas en el artículo 453-13 del INVÍAS para la elaboración de mezclas drenantes.

2. METODOLOGÍA

2.1 Recursos utilizados y caracterización de materiales

Para la fabricación de las mezclas drenantes convencionales (MD) y modificadas con fibra (MD-F) objeto de este estudio, se empleó material pétreo procedente de río, sometido a proceso de trituración que cumple con las especificaciones dadas en el artículo 453-13 del Instituto Nacional de Vías (INVÍAS) para mezclas drenantes. Igualmente se empleó cemento asfáltico CA 60-70 (PG 64-22) normalizado y como aditivo modificador, fibra acrílica.

2.1.1 Caracterización de materiales pétreos

En la Tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de laboratorio realizados sobre el material pétreo utilizado para la elaboración de las mezclas drenantes en estudio. Los resultados muestran el cumplimiento de los requisitos mínimos exigidos en las especificaciones de INVÍAS en el Artículo 453-13 para las mezclas drenantes.

Tabla 1. Resultados de ensayos a material pétreo

| Ensayo | Especificación | Resultado | Valor especificado |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------|---------------------------|
| Humedad | INV.E-122-13 | 1,49 | - |
| Desgaste Micro-Deval | INV.E-238-13 | 8,97 | 20% máximo |
| Caras fracturadas en los agregados | INV.E-127-13 | 95% | (85/70) 1 cara/2 caras |
| Sanidad frente al ataque de sulfatos | INV.E-220-13 | 0,63% | 12 % máximo |
| 10% de finos (valor en seco) | INV.E-224-13 | 140kN | 110 kN mínimo |
| Equivalente de arena | INV.E-133-13 | 55,13 | 50% mínimo |
| Índice de aplanamiento | INV.E-230-13 | 18% | - |
| Índice de alargamiento | INV.E-230-13 | 7% | - |

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Caracterización de cemento asfáltico

Se ensayó sobre el cemento asfáltico CA 60-70 sin modificar y modificado con fibra acrílica. En la Tabla 2 se presentan los resultados de los mismos.

2.2 Proceso para determinar parámetros de mezcla entre asfalto-fibra

Con el propósito de determinar la temperatura y tiempo de mezcla entre el CA 60-70 y la fibra, se realizaron ensayos de penetración sobre el asfalto combinado con el aditivo (fibra) en proporciones del 0.1%, 0.2% y 0.3% (AASHTO T 49). Los resultados se presentan en la Tabla 3. En la Tabla 4 se define de acuerdo con los resultados anteriores, los parámetros de tiempo y temperatura a emplear en la investigación para la mezcla entre el asfalto y la fibra.

2.3 Proceso de investigación en el laboratorio

Para la fabricación de las mezclas drenantes modificadas con fibra y sin modificar (mezclas control) se utilizó material pétreo con granulometría dada por INVÍAS, específicamente en el artículo 453-13, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 2. Resultados de ensayos en CA 60-70 sin modificar y modificado con fibra

| (%) Fibra | Ductilidad (cm) AASHTO T 51 | Punto de Ignición y de llama (°C), ASTM D-92 | | Punto de Ablandamiento (°C) AASHTO T 53 | Penetración (0,1 mm), AASHTO 49 |
|--------------|--------------------------------|---|---------------------|--|--|
| | | P. Ignición (°T) | P. de Llama (°T) | °C | |
| 0 | 141,7 | 315,56 | 337,73 | 44 | 59,5 |
| 0,1 | 77,3 | 298 | 303 | 47,5-48 | 30 |
| 0,2 | 63,7 | 299 | 302 | 52,2-52,5 | 29 |
| 0,3 | 50 | 308 | 312 | 53,4-53,6 | 29,5 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Resultados ensayo de penetración en asfalto-fibra para varios porcentajes de fibra y tiempos de mezcla con °T de mezcla de 110°C

| % de Fibra | °T de ensayo | Penetración (0,1 mm) AASHTO T 49 | Tiempo (minutos) |
|------------|--------------|-------------------------------------|---------------------|
| 0,10% | 24,5 | 39 | 40 |
| 0,10% | 23,7 | 36 | 60 |
| 0,10% | 23,7 | 36 | 90 |
| 0,30% | 23,3 | 34 | 40 |
| 0,30% | 22,3 | 30 | 60 |
| 0,30% | 23,3 | 31 | 90 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Parámetros definidos para las mezclas entre asfalto-fibra

| % de Fibra respecto al peso de Asfalto | Temperatura de mezcla °C | Tiempo de mezcla (minutos) |
|---|-----------------------------|-------------------------------|
| 0,1 | 110 | 60 |
| 0,2 | 110 | 60 |
| 0,3 | 110 | 60 |

Fuente: Elaboración propia

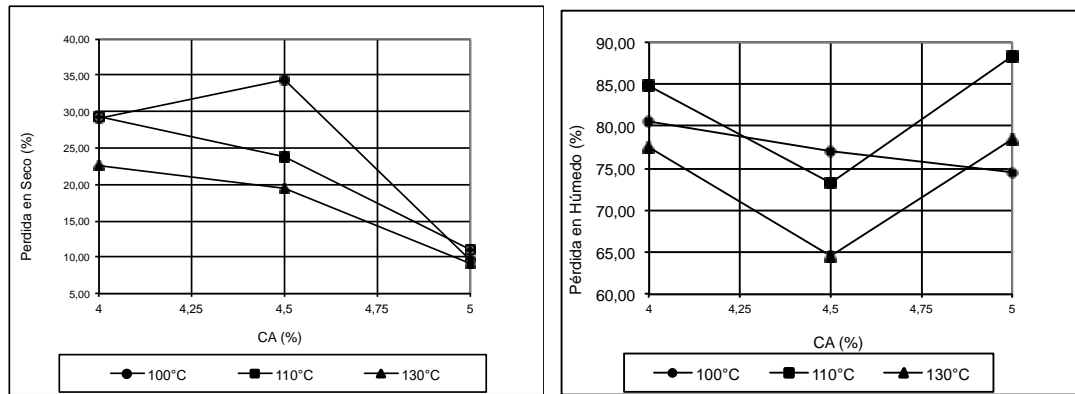
Tabla 5. Granulometría para mezclas drenantes

| Tamiz | | % Pasando |
|----------|-------------|-----------|
| Normal | Alternativo | |
| 19.00 mm | ¾" | 100 |
| 12.50 mm | ½" | 85 |
| 9.50 mm | 3/8" | 62,5 |
| 4.75 mm | Nº 4 | 23,5 |
| 2.00 mm | Nº 10 | 14,5 |
| 425 um | Nº 40 | 8,5 |
| 75 um | Nº 200 | 5 |

Fuente: Elaboración propia

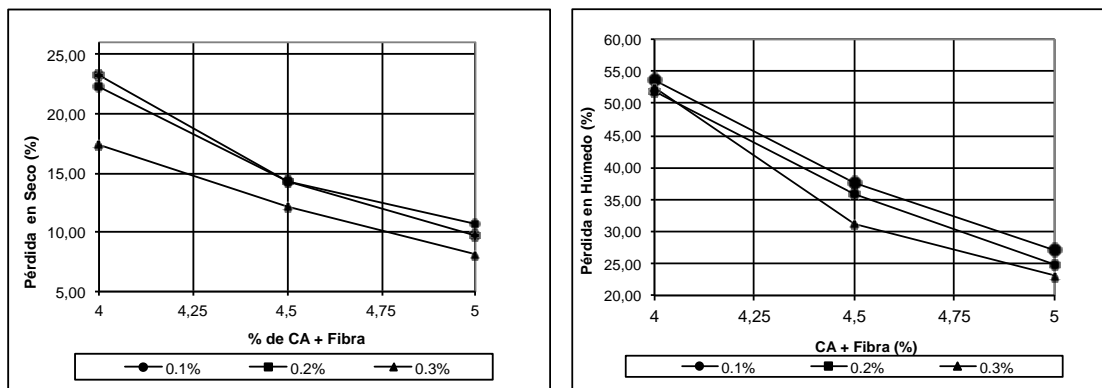
Se fabricaron inicialmente mezclas drenantes de control (MD) y modificado con fibra (MD-F) usando porcentajes de asfalto de 4.0%; 4.5% y 5.0%. La temperatura para fabricar mezclas drenantes que se recomienda de acuerdo a la especificación ASTM D 6925 es aquella donde el asfalto alcance una viscosidad entre 700 Cp y 90 Cp. Las mezclas drenantes convencionales fueron fabricadas por ensayo y error a temperatura de mezcla de 130°C y de compactación de 130°C, 110°C y 100°C. Para las mezclas drenantes modificadas con fibra, la temperatura de mezcla y compactación fue de 160°C. Para cada combinación entre el asfalto y la fibra (0.1%, 0.2% y 0.3%) fueron fabricadas cinco briquetas para realizar el ensayo del cántabro en seco y en húmedo; esta última después de haber sometido las briquetas a condiciones sumergidas durante 24 horas a 60°C (en el baño maría). Las mezclas se compactaron a 50 golpes por cada cara, con un peso de 1000 gramos, de acuerdo a especificaciones dadas por INVÍAS en su artículo 453-13.

Para determinar el porcentaje óptimo de asfalto se utilizaron los criterios dados por INVÍAS (2013) para el diseño de mezclas drenantes: el porcentaje de vacíos con aire debe estar entre 20% y 25% (AASHTO T269); el desgaste en el ensayo del cántabro debe ser inferior al 25% en seco y menor a 40% en húmedo (Baño de María a 60°C durante 24 horas); el porcentaje de asfalto no debe ser inferior a 4.5%; el tiempo que tarde 100 ml de agua en atravesar una mezcla drenante no debe exceder 15 segundos. Después de determinado el contenido de asfalto óptimo (4.5%), se fabricaron nuevas briquetas para evaluar la resistencia bajo carga monotónica Marshall (AASHTO T 245-97), la rigidez bajo carga cíclica con la determinación del módulo resiliente (AASHTO TP31) a temperaturas de (10°C, 20°C y 30°C), con frecuencias de carga de (2.5Hz, 5Hz y 10Hz); cada ensayo de módulo resiliente fue realizado sobre nueve muestras (tres por cada temperatura).



a) b)
Figura 1. Desgaste por abrasión en mezclas drenantes convencionales (sin aditivos, con variación en la temperatura de compactación) a) en seco; b) en húmedo

Fuente: Elaboración propia



a) b)
Figura 2. Desgaste por abrasión en mezclas drenantes modificadas (con fibra al 0.1%, 0.2% y 0.3%). a) en seco; b) en húmedo

Fuente: Elaboración propia

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1. Desgaste por abrasión (ensayo del cántabro)

Los resultados obtenidos en las mezclas drenantes convencionales MD y modificadas con fibra MDF al 0.1%, 0.2% y 0.3% se muestran en las Figuras 1 y 2 respectivamente. La Figura 1b muestra que a la más baja temperatura a la que se compactan las muestras (100°C), el desgaste por abrasión en húmedo para mezclas de control (sin aditivo) no conserva el mismo comportamiento que las muestras compactadas a 110°C y a 130°C. Para estas dos últimas temperaturas el menor valor de desgaste se encuentra para el porcentaje óptimo de las mezclas a 4.5%. Caso contrario para 100°C, donde el menor valor de desgaste se da a la mayor adición de asfalto (5%). Lo anterior puede atribuirse a que se requiere una mayor cantidad de ligante para garantizar mayor adherencia entre los materiales cuando se compactan a bajas temperaturas los especímenes y se someten a condiciones de humedad.

Los mejores resultados se obtienen en las mezclas drenantes modificadas con fibra; a medida que se aumenta el porcentaje de fibra en el asfalto los desgastes por abrasión son menores en las briquetas. Los valores de pérdida de desgaste por abrasión para los tres porcentajes de fibra cumplen con las especificaciones dadas en el INVÍAS para condiciones en seco (deben ser menor a 20%). Se reporta una disminución el desgaste por abrasión de las briquetas modificadas con fibra (ensayadas en seco) en un 27% con respecto a las ensayadas sin aditivo; la fibra actúa como un mejorador en la adherencia entre el asfalto y el material pétreo, reportando una disminución del 40% en el desgaste por abrasión en condiciones en húmedo, comparadas con las mezclas drenantes convencionales. Las mezclas drenantes tienden a resistirse a la desenvuelta del agua cuando entran en contacto con ellas, de acuerdo con (González y García, 2004) una de las ventajas de las fibras acrílicas es que son hidrófobas y tienen afinidad con el betún, por lo que permiten obtener mezclas resistentes a la acción del agua, con menor envejecimiento.

3.2 Resistencia bajo carga monotónica (Marshall)

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el ensayo del cántabro, para el ensayo Marshall se fabricaron muestras con porcentaje de asfalto-fibra de CA=4.5% y temperatura de mezcla y compactación de 160°C. En la Tabla 6 se muestran los resultados de la resistencia bajo carga monotónica Marshall. Se observa un incremento de la estabilidad sobre las mezclas modificadas con fibra y en la relación estabilidad/flujo (E/F). Lo anterior indica que las mezclas drenantes modificadas con fibra son más resistentes bajo carga monotónica.

3.3 Módulo resiliente

Para realizar el ensayo de módulo resiliente, fueron fabricadas muestras con porcentajes de asfalto-fibra de CA= 4.5% con Fibra/CA= 0.1% de fibra, a temperatura de mezcla y compactación de 160°C. La Figura 3 muestra los resultados de los módulos resilientes para mezclas MD sin modificar y modificadas con fibra para 10°C, 20°C y 30°C. Se puede observar incremento en los valores de módulo resiliente al disminuir la temperatura e incrementar la frecuencia de carga tanto para mezclas drenantes convencionales MD como para mezclas drenantes con fibra MDF. Al comparar las mezclas modificadas y las sin aditivo se nota un aumento en los módulos resilientes cuando existe modificación del asfalto con la fibra para todas las temperaturas. El incremento promedio en el módulo es aproximadamente de 40% a cualquier temperatura de ensayo.

Tabla 6. Estabilidad-Flujo y relación estabilidad/flujo

| Mezcla | CA (%) | Fibra/CA (%) | Flujo (mm) | E(kN) | E/F (kN/mm) |
|-------------|--------|--------------|------------|-------|-------------|
| Fibra= 0% | 4.5 | 0 | 4.83 | 38.5 | 7.98 |
| Fibra= 0,1% | 4.5 | 0,1 | 4.26 | 58.9 | 13.84 |

Fuente: Elaboración propia

4. CONCLUSIONES

La presente investigación estudió las mezclas drenantes modificadas con fibra por vía húmeda la resistencia al desgaste por abrasión en el ensayo del cántabro, la resistencia bajo carga monotónica en el Marshall y la resistencia bajo carga cíclica en el módulo resiliente. La adición de fibra por vía húmeda al asfalto logra incrementar su viscosidad, haciendo que el asfalto se comporte más rígido. Lo anterior proporciona a las mezclas drenantes mayor adherencia entre el material pétreo y el asfalto.

Se pudo observar una disminución notoria en el desgaste por abrasión de las mezclas drenantes modificadas con fibra (MDF). Hubo una disminución del 27% y 40% en el desgaste por abrasión de las mezclas drenantes en seco y en húmedo respectivamente.

Se mostró mayor resistencia bajo carga monotónica y mayores módulos bajo carga cíclica en las mezclas drenantes modificadas con fibra. Se reporta un aumento de la estabilidad bajo carga monotónica del 30% y un aumento de los módulos bajo carga cíclica del 40% aproximadamente.

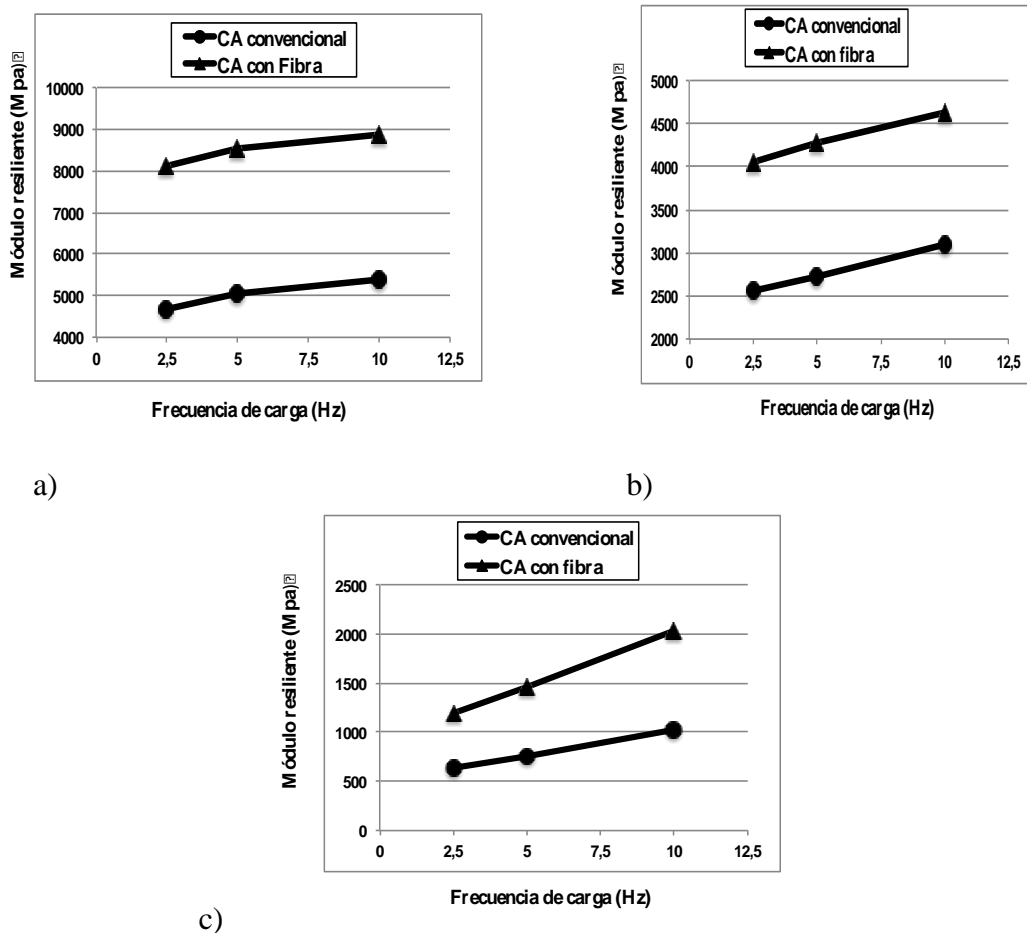


Figura 3. Módulos resilientes para mezclas drenantes MD sin modificar y modificadas con fibra. a) 10°C; b) 20°C; c) 30°C

Fuente: Elaboración propia

Se cumple con la hipótesis de obtener menores desgastes en los especímenes de mezclas asfálticas drenantes con el uso de fibra acrílica, comparados con las muestras de control. Lo anterior se debe al incremento de la viscosidad y de la rigidez en el cemento asfáltico al ser modificado con el aditivo, que se representa en aumento de adherencia entre el ligante y el material pétreo.

Igualmente se comprueba la hipótesis de alcanzar mayores resistencias bajo carga monótonica y carga cíclica en mezclas modificadas con fibra, comparadas con las mezclas de control (sin aditivo), lo cual se debe a la rigidez que adquiere el asfalto al ser modificado con la fibra.

La investigación se limitó a medir el desgaste por abrasión (ensayo cántabro) en la máquina de los ángeles en las muestras asfálticas drenantes de control y las modificadas con asfalto-fibra. Igualmente se limitó a medir la resistencia bajo carga monótonica (ensayo Marshall) y bajo carga cíclica (ensayo módulo resiliente) en los dos tipos de mezclas fabricadas en el laboratorio.

REFERENCIAS

- ANURAG, K., XIAO, F., Y AMIRKHANIAN, S. (2002). *Laboratory Investigation of Indirect Tensile Strength Using Roofing Polyester Waste Fibers in Hot Mix Asphalt*. Construction and Building Materials, Volume 23, Issue 5, 1–28.
- BRINGAS, M., Y RODRÍGUEZ, C. (1999). *Empleo de Fibras en la elaboración de mezclas asfálticas para pavimentos de graduación abierta*. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- CHEN, J., CHEN, S., Y LIAO, M. (2013). *Laboratory and Field Evaluation of Porous Asphalt Concrete*. Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol 9.
- CHEN, J. Y LIN, K. (2005). *Mechanism and behavior of bitumen strength reinforcement using fibers*. Journal of Materials Science. Volume 40, pp 87-95. <http://doi.org/10.1007/s10853-005-5691-4>.
- COOLEY, L., BROWN, E. Y WATSON, D. (2000). *Evaluation Of Ogfc Mixtures Containing Cellulose Fibers*. Transportation Research Record.
- GLOBAL ROADS MANAGMENT CONSULTING S.C. (2008). *Evaluación técnica-económica del uso de la fibra acrílica DURAKAL en carpetas asfálticas con el modelo HDM-4*.
- GONZÁLEZ, D. Y GARCÍA, J. (2004). *Influencia de las fibras acrílicas en las mezclas porosas y en las mezclas convencionales*. Revista Carreteras, Número 131, paginas 74 a 80.
- JIMÉNEZ, M. Y MRAWIRA, D. (2007). *Efecto de la granulometría y fibra en el desempeño de las mezclas drenantes en Costa Rica*.
- MIRÓ, R. (2006). *Nuevas mezclas para capas de rodadura y su influencia en el confort (Ruido) Y la Seguridad*.

PÉREZ, F., MIRO, R., FONSECA, C., Y CANCER, J. (1997). *Mezclas Bituminosas con Fibras para capas de rodadura resistentes a la propagación de fisuras*. Ponencia preparada para presentar en la sesión 10 del XII Congreso Mundial de Carreteras de IRF, 1997 Toronto, Ontario, Canada.

RAMÍREZ, L., ARCE, M., ELIZONDO, F., Y JIMÉNEZ, M. (2005). *Mezclas Drenantes*.

RAMZANPOUR, N., Y MOKHTARI, A. (2011). *Evaluación de laboratorio de mezclas SMA contienen diferentes aditivos*. URL: <http://scialert.net/abstract/>.

REYES, O. Y REYES, F. (2005). *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Revista Ciencia e Ingeniería Neogranadina, número 15, páginas 12 a 28.

ROULLET, G. (2009). *Seguimiento y comparación de caminos de pavimento asfáltico con mezcla drenante*.

SHAOPENG, W., QUNSHAN, V., NING, L., Y HONGBO, Y. (2016). *Efectos de las fibras sobre las propiedades dinámicas de las mezclas asfálticas*. Revista de Universidad Tecnológica de Wuhan-Mater.Sci.Ed. Voúmen 22, Número 4, pp 733-736.

STEMPIHAR, J., SOULIMAN, M. Y KALOUSH, K. (2011). *Use of Fiber Reinforced Asphalt Concrete as a Sustainable Paving Material for Airfields*.

SUCHISMITA, A., PANDA, M., CHATTARAJ, U., Y GÁSPÁR, L. (2011). *Fatigue Characteristics of Stone Matrix Asphalt Mixes in Warm Climate*. Acta Technica Jaurinensis Vol 4(Nº3), 319–328.

SECCIÓN 10

SEGURIDAD EN SISTEMAS TRANSPORTE

SECURITY IN TRANSPORTATION SYSTEMS

56 Factores que afectan la severidad de accidentes urbanos. El caso de Cartagena de Indias

Carmelo J. Díaz

Víctor Cantillo

Universidad del Norte, Colombia

Luis Márquez

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Colombia

RESUMEN

El presente estudio desarrolla modelos estadísticos para identificar los factores claves que influyen en la severidad de los accidentes de tránsito que se generan en el área urbana de la ciudad de Cartagena de Indias, con el fin de brindar información que permita a los tomadores de decisiones focalizar mejor las políticas de reducción de accidentes de tránsito en la ciudad.

Los datos utilizados provienen de los registros oficiales de accidentalidad de tránsito en Colombia. La información comprende los siguientes grupos de variables: datos de la víctima, información del vehículo, referencia temporal, medio ambiente, geometría de la vía, dispositivos de control y características operacionales. El proceso de adecuación de la base de datos permitió contar con un total de 2,339 registros, una muestra más que suficiente para el proceso de modelación.

El estudio especificó tres clases de modelos de tipo logit: multinomial, jerárquico y ordinal. Se encontró que individuos de sexo masculino con más de 60 años de edad, presentan una mayor incidencia de accidentes mortales, en comparación con accidentes de menor severidad. Además, en horas de la mañana y de la tarde hay menos probabilidad de accidentes con muertos, en referencia a los accidentes de sólo daños. En el caso de accidentes con heridos se encontró que en la noche aumenta su probabilidad de ocurrencia.

Palabras clave: accidentalidad vial, severidad de accidentes, modelos de tipo logit.

1. INTRODUCCIÓN

La accidentalidad vial es un problema de difícil solución debido en parte, a su aleatoriedad, a la precariedad del diseño vial, al acelerado crecimiento del parque vehicular y la baja efectividad de las medidas adoptadas. En la última década, muchos países se han dado cuenta de la gravedad de este problema, por lo que han adoptado diversas medidas para contrarrestarlo.

Según el Instituto de Medicina Legal y Ciencias Forenses de Colombia, los accidentes de tránsito se han constituido en la segunda causa de muerte violenta en el país. Entre los años 2005 y 2014, más de 58,000 colombianos murieron y más de 413,000 vieron afectada su calidad de vida debido a una lesión en un accidente de tránsito. Ésta es una situación que reclama especial atención por parte de los agentes involucrados con el propósito de reducir el número de muertos y lesionados, así como los altos costos que generan los accidentes de tránsito en las vías colombianas.

En Cartagena de Indias, la tasa de muertos por cada cien mil habitantes ha pasado de 6.67 a 7.64 entre los años 2010 y 2011. En contraposición, la tasa de lesionados disminuyó en este mismo periodo, pasando de 72.86 en el 2010 a 59.90 en el 2012. En relación con el tipo de vehículo involucrado en el accidente, la motocicleta, con más del 60% de los casos, surge como el vehículo que registra los mayores índices de accidentalidad, lo que constituye una diferencia entre el problema de Cartagena y lo que ocurre en ciudades localizadas en países con mayores ingresos.

El objetivo general de esta investigación es identificar los factores que influyen en la severidad de accidentes ocurridos en el área urbana de Cartagena de Indias, a partir de utilizar modelos discretos. Para tal fin, se identifican y revisan los esquemas metodológicos propuestos para la modelación de la severidad de accidentes en áreas urbanas, se consolida y geo-referencia una base de datos con la información de accidentalidad de la ciudad entre los años 2010 a 2012 y, al final, se realiza un análisis estadístico de los datos con fines de modelación.

Los resultados proveen a las autoridades una orientación en cuanto a los principales factores que influyen en la severidad de los accidentes en las vías urbanas, lo que facilita el establecimiento de políticas para reducir dicha problemática. Las principales contribuciones del trabajo se refieren al análisis y desarrollo de diferentes modelos para la identificación de los factores influyentes en el nivel de severidad de los accidentes urbanos, con el uso de las bases de datos de accidentalidad, combinadas con información de las características geométricas y operacionales de las vías.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 Factores de riesgo

De acuerdo con Kemal y Oktay (2014) entre los factores de riesgo asociados con la severidad de las lesiones en accidentes de tránsito, se pueden citar: la condición de usuario, el vehículo, el medio ambiente y las características geométricas de la vía. Adicionalmente, otro factor determinante de la severidad es el tipo de accidente, tal como se ve en el trabajo de Kockelman y Kweon (2002). Factores como la edad y el género de la víctima han sido ampliamente considerados como posibles factores de riesgo para la severidad de los accidentes de tránsito. Aunque los conductores masculinos tienden a ser menos precavidos

(Valent et al., 2002), algunos estudios han mostrado que los conductores femeninos, al igual que personas de edad avanzada, tienen mayor probabilidad de lesiones más graves (Zhang et al., 2014). Algunos investigadores clasifican la edad por categorías mientras que otros sugieren la especificación como variable continua (Abdel-Aty y Abdelwahab, 2004).

En cuanto al vehículo, específicamente en accidentes de motocicletas, la evidencia señala que factores como el choque con objetos fijos, colisiones con peatones y la cilindrada del motor, están fuertemente relacionados con las lesiones de alta severidad (Quddus et al., 2002). En la misma línea, Eluru et al. (2008) mostraron que las variables más importantes que influían en la severidad de las lesiones de ciclistas y peatones eran la edad, el límite de velocidad, la localización y la hora del día. Ulfarsson y Mannering (2004) consideraron además el número y tipo de vehículos involucrados.

Con respecto a las características de la vía, la literatura asocia los límites de velocidad con las severidades de las lesiones en accidentes de tránsito (Eluru y Bhat, 2007; Malyshkina y Mannering, 2009; Habtemichael y de Picado-Santos, 2013; Yasmin y Eluru, 2013). Además, en la misma línea de Haleem y Gan (2015), el flujo de tránsito ha sido considerado como predictor de la severidad.

Finalmente, con respecto al tipo de accidente, Kockelman y Kweon (2002) mostraron que los volcamientos y los choques frontales son especialmente graves y contribuyen al nivel de severidad, incluso más que el exceso de velocidad.

2.2 Estructuras de modelación

Además de los modelos de tipo logit multinomial (MNL) que son los más conocidos, los modelos de tipo logit anidado (NL) han sido ampliamente usados en el análisis de datos de severidad en accidentes de tránsito, debido a la flexibilidad en términos de la captura de los efectos de las variables independientes comparados con otros modelos (Patil et al., 2012). Holdridge et al. (2005) analizaron el desempeño en el servicio de equipos de carretera en todo el sistema de la Ruta Estatal urbana en el estado de Washington, mediante el desarrollo de modelos NL para estudiar la severidad de las lesiones en choques con objeto fijo.

Chang y Mannering (1999) utilizaron modelos NL para estudiar la severidad de las lesiones, condicionada a diferentes ocupaciones de vehículos. Los resultados de este estudio demostraron que el modelo NL, que fue capaz de tener en cuenta los efectos de ocupación de los vehículos e identificar una amplia gama de factores que influyen en las lesiones de los ocupantes, es un enfoque metodológico prometedor. Shankar et al. (1996) presentaron también una formulación NL como un medio para determinar la gravedad de los accidentes en las carreteras rurales. En su estudio llegaron a la conclusión que un modelo NL con variables no observadas, comunes entre los daños materiales y los posibles accidentes con lesiones, siempre proveían mejor ajuste estructural para la distribución observada de severidad de accidentes.

Wang y Abdel-Aty (2008) examinaron la severidad de las lesiones de choques por giro a la izquierda mediante un modelo logit ordenado (OL). Este estudio encontró que ni el volumen total de la aproximación, ni todo el volumen de la intersección, sino más bien los movimientos específicos de los vehículos afectaban significativamente la severidad de las lesiones.

Abdel-Aty (2003) analizó la gravedad de las lesiones del conductor en lugares como, las secciones de carreteras, intersecciones señalizadas y plazas de peaje, utilizando el modelo probit ordenado (OP). Este estudio ilustró las similitudes y diferencias en los factores que afectan la severidad de lesiones en las diferentes locaciones. Quddus et al. (2002) utilizaron un modelo OP para examinar los factores que afectan a la severidad de las lesiones de los accidentes de motocicleta y la gravedad de los daños a las motocicletas, así como los vehículos implicados en esos accidentes.

Empleando modelos OL y OP, O'Donnell y Connor (1996) evaluaron las probabilidades de cuatro niveles de severidad de las lesiones en función de atributos del conductor, encontrando que la gravedad de las lesiones aumenta con la velocidad, la antigüedad del vehículo, la edad de los ocupantes, el género femenino, los niveles de alcohol en la sangre, el no uso de cinturón de seguridad y tipo de colisión. El atributo más relevante fue la ubicación de la víctima en el vehículo.

Estudios conducidos por Haleem y Abdel-Aty (2010) emplearon, además de estructuras de tipo OP y NL, un modelo BP para examinar la severidad de las lesiones en accidentes de tránsito en intersecciones no semaforizadas. Ellos encontraron que comparando el modelo BP con el modelo OP, el primero producía mejores resultados. Además, por su sencillez, dichos resultados podrían ser utilizados para modelar la severidad de las lesiones en accidentes en intersecciones no semaforizadas. Por otra parte el enfoque NL no mostró ninguna mejora con respecto a los modelos OP.

Kim et al. (2010) aplicaron un modelo logit mixto (ML) para analizar la gravedad de la lesión de peatones en accidentes entre peatones y vehículos, con el fin de capturar la heterogeneidad no observada. Ellos mostraron que varios factores aumentan significativamente el nivel de lesión fatal, incluyendo la oscuridad, conducir ebrio, y el exceso de velocidad. También encontraron que el efecto de la edad de los peatones se distribuye normalmente a través de las observaciones, y que en los peatones de mayor edad, la probabilidad de lesión fatal aumentó sustancialmente.

Pai et al. (2009) estimaron modelos ML para investigar los factores que contribuyen a la violación del derecho de vía de los motoristas en diferentes tipos de accidentes. Se encontró que el derecho de vía para motocicletas tenía más probabilidades de ser violado en las carreteras no urbanizadas, y en condiciones de luz disminuida. Eluru et al. (2008) desarrollaron un modelo ML ordenado para examinar la severidad de las lesiones por

accidentes de tránsito en peatones y ciclistas. Ellos concluyeron que el modelo ML ordenado no produce estimaciones inconsistentes de los efectos de algunas variables como sí lo hace el modelo OP. El análisis también sugirió que el patrón general y la magnitud relativa de los efectos de elasticidad de los determinantes de la severidad de las lesiones son similares para los peatones y ciclistas.

En la misma línea, Gkritza y Mannering (2008) demostraron que un enfoque ML se puede utilizar para comprender mejor el uso de cinturones de seguridad en vehículos de uno y múltiples ocupantes, concluyendo que el modelo ML puede proporcionar una comprensión mucho más completa de la interacción de las numerosas variables que se correlacionan con el uso de cinturón de seguridad. Milton et al. (2008) analizaron las distribuciones de severidad de las lesiones, y el efecto que el tráfico, la carretera y las características climáticas tienen sobre estas distribuciones, mediante un modelo ML.

3. MODELACIÓN

3.1 Datos

Los datos fueron obtenidos de los registros nacionales de accidentalidad, gestionados por la Corporación Fondo de Prevención Vial, entre los años 2010 a 2012. El tamaño muestral fue de 2,339 registros de accidentes, que cumple con los estándares para la modelación de severidad de accidentes, que sugieren un mínimo de 2,000 observaciones (Kemal y Oktay, 2014).

Se adicionó a la base de datos, información de las características geométricas y operacionales de las vías. Una vez depurada y organizada la base de datos, se verificó la correlación entre las variables con el propósito de seleccionar las variables a ser usadas en la especificación de modelos, excluyendo aquellas que mostraron correlación. La Tabla 1 muestra la media y la desviación de cada variable considerada en la modelación.

3.2 Modelos

Sea P_{ni} , la probabilidad de que el accidente n tenga como resultado la severidad i , donde $i = 1, \dots, I$. Sea además S_{ni} la función de severidad, conformada por un componente sistemático s_{ni} , determinado por variables exógenas que influyen en los resultados de las lesiones, y un componente aleatorio ε_{ni} , que representa la influencia de los resultados de severidad no observados (Ulfarsson y Mannering, 2004).

Tabla 1. Variables independientes seleccionadas para modelación

| Variable | Categorías | Abreviatura | Definición | Media | Desviación |
|------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|-------------------|
| Edad | Menos de 24 | <i>Edad_0a24</i> | 1: 0 a 24 | 0.242 | 0.428 |
| | 25 a 59 | | 0: Se tomó como base | | |
| | 60 o más | <i>Edad_60oMas</i> | 1: 60 o más | 0.094 | 0.292 |
| Género | Femenino | | 0: Se tomó como base | | |
| | Masculino | <i>SexMascu</i> | 1: Masculino | 0.684 | 0.465 |
| Tipo | Auto | | 0: Se tomó como base | | |
| | Bus o Camión | <i>TipoVehBusoCa</i> | 1: Bus o camión | 0.162 | 0.368 |
| | Moto | <i>TipoVehMoto</i> | 1: Moto | 0.605 | 0.489 |
| | Bicicleta | <i>TipoVehBici</i> | 1: Bicicleta | 0.027 | 0.162 |
| Periodo de día | Madrugada | | 0: Se tomó como base | | |
| | Mañana | <i>PeriodoManana</i> | 1: Mañana | 0.296 | 0.457 |
| | Tarde | <i>PeriodoTarde</i> | 1: Tarde | 0.352 | 0.478 |
| | Noche | <i>PeriodoNoche</i> | 1: Noche | 0.283 | 0.451 |
| Día de la semana | Día hábil | | 0: Se tomó como base | | |
| | Fin de semana | <i>DiaFinSem</i> | 1: Fin de semana | 0.320 | 0.466 |
| Estación | Invierno | <i>EstInvierno</i> | 1: Invierno | | |
| | Verano | | 0: Se tomó como base | | |
| Uso de suelo | Residencial | | 0: Se tomó como base | | |
| | Industrial | <i>SueloInd</i> | 1: Industrial | 0.054 | 0.227 |
| | Comercial | <i>SueloCom</i> | 1: Comercial | 0.122 | 0.327 |
| | Institucional | <i>SueloInst</i> | 1: Institucional | 0.375 | 0.484 |
| | Protección | <i>SueloProtec</i> | 1: Protegido | 0.044 | 0.204 |
| Tipo de vía | Arterial | <i>TipoViaArteria</i> | 1: Si es Arterial | 0.341 | 0.474 |
| | Colectora | <i>TipoViaColect</i> | 1: si es Colectora | 0.188 | 0.391 |
| | Local | | 0: Se tomó como base | | |
| Ancho de calzada | | <i>AnchoCalz</i> | Variable continua en metros | 7.408 | 2.435 |
| Sentidos | Un sentido | | 0: Se tomó como base | | |
| | Doble sentido | <i>DobSentido</i> | 1: Doble sentido | | |
| Ancho separador | | <i>AnchoSep</i> | Variable continua en metros | | |
| Ancho andén | > 1m | <i>AnchoAnden</i> | 1: Si > 1m | 0.879 | 0.327 |
| | < 1m o no hay | | 0: Se tomó como base | | |
| Estado pavimento | Buen estado | | 0: Se tomó como base | | |
| | Mal estado | <i>PavMalo</i> | 1: Mal estado | 0.032 | 0.175 |
| Variable | Categorías | Abreviatura | Definición | Media | Desviación |
| Cruce peatonal | Demarcado | <i>CrucePeatDem</i> | 1: Demarcado | | |
| | No demarcado | | 0: Se tomó como base | | |

| | | | | | |
|-----------------|-------------|--------------------|--|-------|-------|
| Semáforo | Presente | <i>PresSem</i> | 1: Hay semáforo | 0.833 | 0.373 |
| | No presente | | 0: Se tomó como base | | |
| Puente peatonal | Presente | <i>PuentePeat</i> | 1: Hay puente peatonal | | |
| | No presente | | 0: Se tomó como base | | |
| Velocidad | > 40 km/h | <i>VelMay40Kmh</i> | 1: > 40 km/h, 0 en otro caso | 0.706 | 0.456 |
| | < 40 km/h | | 0: Se tomó como base | | |
| TPDA | | <i>TPDA</i> | Variable continua en vehículos mixtos al día | 20907 | 22924 |

El componente sistemático es fijado para cada n y puede ser representado por una función lineal en los parámetros,

$$s_{ni} = \beta'_i x_n \quad (1)$$

Donde x_n es un vector de variables exógenas que explican la severidad de las lesiones y β_i es un vector de parámetros de severidad estimables. La probabilidad de que un accidente n tenga un nivel de severidad i está dado por:

$$P_{ni} = \left(\max_{i' \neq i} s_{ni'} + \varepsilon_{ni'} \leq s_{ni} + \varepsilon_{ni} \right) \quad (2)$$

Suponiendo que ε_{in} tiene distribución de valor generalizado extremo (GEV), el modelo logit Multinomial (MNL) puede ser derivado como sigue (McFadden, 1981):

$$P_{ni} = \frac{e^{\beta'_i x_n}}{\sum_{i'=1}^I e^{\beta'_{i'} x_n}} \quad (3)$$

Dada la Ecuación 3 los valores de los coeficientes en el vector β pueden ser estimados usando métodos estándar de máxima verosimilitud. Dado que las variables explicativas no varían en las lesiones, la $I - 1$ razón de oportunidad de los resultados se vuelve:

$$\ln \left(\frac{P_{ni}}{P_{nI}} \right) = \beta'_i x_n - \beta'_I x_n = (\beta'_i - \beta'_I) x_n \quad (4)$$

Por identificación, los coeficientes del caso base se fijan en cero (Greene, 1997). Se ha supuesto comúnmente que los accidentes de tráfico mortales tienen la mayor tasa de reporte (Yamamoto et al., 2008), por lo que se sugiere el uso de los niveles de severidad de lesiones fatales como categoría base (Ye y Lord, 2014).

El supuesto básico del modelo MNL es que los errores ε_{in} son independientes. Si algunas categorías comparten efectos no observados resultarán graves errores de especificación (Lee y Mannering, 2002), siendo recomendable el uso de una estructura NL, que agrupa a las

alternativas con términos de error correlacionados en un nido por estimación de un modelo que sólo incluye los accidentes con resultados en la agrupación anidada. El modelo tiene la siguiente forma (McFadden, 1981),

$$P_n(i) = \exp[\beta_i X_n + \Theta_i L_{in}] / \sum_i \exp[\beta_i X_n + \Theta_i L_{in}] \quad (5)$$

$$P_n(k|i) = \exp[\beta_{k|i} X_n] / \sum_K \exp[\beta_{k|i} X_n] \quad (6)$$

$$L_{in} = \ln[\sum_K \exp(\beta_{k|i} X_n)] \quad (7)$$

Donde $P_n(i)$ es la probabilidad incondicional de que el accidente n tenga severidad i , X_n es un vector de características medibles que determinan la gravedad del accidente, $P_n(k|i)$ es la probabilidad de que el accidente n tenga severidad k condicionado a que la severidad este en la categoría i y K es el conjunto condicional de categorías de severidad (condicionado en i). L_{in} es el valor inclusivo (log sum), y Θ_i es un coeficiente estimable con un valor entre cero y uno para ser consistente con la derivación del modelo (McFadden, 1981).

Por su parte, los modelos OL pueden especificarse como sigue:

$$I_p^* = \beta' X_p + \varepsilon_p \quad (8)$$

Donde I_p^* es una variable descriptora inobservada que mide la severidad del p-ésimo accidente; β es un vector de parámetros desconocidos; X_p es un vector de variables medibles observadas que describen las características del p-ésimo accidente; y ε_p es un término de error del p-ésimo accidente. Sólo es posible observar I_p (categorías de lesiones) de un conjunto de datos dado, debido a que I_p^* es un descriptor continuo, subyacente, inobservable. Así la Ecuación 8 para I_p^* puede ser transformada a la forma:

$$I_p = \begin{cases} 1 & \text{si } -\infty < I_p^* \leq \psi_1 \text{ SDM} \\ 2 & \text{si } \psi_1 < I_p^* \leq \psi_2 \text{ Heridos} \\ 3 & \text{si } \psi_2 < I_p^* \leq \infty \text{ Muertos} \end{cases} \quad (9)$$

Donde los valores del umbral (ψ_1 , ψ_2 , y $\psi_1 \leq \psi_2$) son parámetros desconocidos a ser estimados junto con β (Ver Jang et al., 2010). Entonces, la probabilidad de:

$$P(I_p = i) = F(I_p^* < \psi_i - \beta' X_p) - F(I_p^* < \psi_{i-1} - \beta' X_p) \quad (10)$$

Donde, $P(I_p = i)$ es la probabilidad de que un p-ésimo accidente resulte en un nivel de severidad ($i = 1, 2$ y 3); $F(I_p^* < \psi_0 - \beta' X_p) = 0$; $F(I_p^* < \psi_3 - \beta' X_p) = 1$; y $F(\cdot)$ es la función de distribución acumulada.

Una vez estimados los parámetros del modelo, el cambio en la probabilidad en cada factor de riesgo debería ser calculado para examinar adecuadamente los efectos marginales. En el caso de variables discretas, la pseudo-elasticidad directa de la probabilidad, es decir, el cambio porcentual en la probabilidad cuando una variable indicadora es cambiada de 0 a 1, se puede determinar como:

$$E_{x_{nk}}^{P_{ni}} = \left[e^{\beta_{ik}} \frac{\sum_{i=1}^I e^{\beta'_{i}x_n}}{\sum_{i=1}^I e^{\Delta(\beta'_{i}x_n)}} - 1 \right] x \ 100, \quad (11)$$

Donde I es el número de posibles resultados, $\Delta(\beta'_{i}x_n)$ es el valor de la función determinante del resultado, s_{ni} , después x_{nk} ha sido cambiado de cero a uno mientras que $\beta'_{i}x_n$ es el valor cuando $x_{nk} = 0$, x_n es un vector de K variables explicativas compartido por todos los resultados, β_i es un vector de coeficientes estimados en las K variables para el resultado i , y β_{ik} es el coeficiente en x_{nk} en el resultado i . La Ecuación 11 es válida sólo para pseudo-elasticidades de observaciones específicas de variables binarias (Ulfarsson y Mannering, 2004).

3.3 Estimación

La severidad fue codificada como 1-Muerto, 2-Herido y 3-Sólo daño material. En el caso del modelo OL, se anidaron las severidades 1-Muerto y 2-Herido. La estimación de los modelos empleó el “software” de uso libre BIOGEME (Bierlare, 2008), tomando como base la severidad 3-Sólo daño material. Los resultados del proceso de estimación son presentados en la Tabla 2 que presenta el coeficiente estimado y entre paréntesis el valor del estadístico t .

En el mejor modelo (MNL), un coeficiente positivo indica que la variable se asocia con una mayor probabilidad de estar en ese nivel de severidad, en relación con la severidad de referencia. Los efectos marginales de cada variable son presentados en la Tabla 3. En el caso de las variables ficticias, los efectos marginales representan la influencia de un cambio de la variable sobre la probabilidad de que se presente el nivel de severidad.

4. DISCUSIÓN

Se encontró que las personas mayores de 60 años tienen 149.3% más probabilidad de sufrir accidentes fatales que accidentes con sólo daños materiales, siendo consistente con otras investigaciones que han considerado dicha variable como posible factor de riesgo para las lesiones fatales (Valent et al., 2002; Abdel-Aty y Abdelwahab, 2004; Islam y Mannering, 2006; Kim et al., 2007; Eluru et al., 2008; Stone y Broughton, 2003). Aunque existe un consenso general entre los estudios de que los conductores mayores tienden a reaccionar más lento que los conductores jóvenes (Yan et al., 2005), sus altas tasas de lesiones graves pueden estar asociadas también con factores psicológicos (Shankar y Mannering, 1996).

Tabla 2. Modelos estimados

| Variable | MNL | NL | OL |
|----------------------------|----------------|----------------|------------------|
| Edad_60oMas_1 | 1.080 (4.71) | 1.000 (2.97) | -0.529(-2.73) |
| Edad_60oMas_2 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | |
| SexMascu_1 | 1.080 (4.49) | 0.993 (2.81) | -0.420 (-3.41) |
| SexMascu_2 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | |
| PerManana_1 | -0.955 (-3.96) | -0.916 (-3.55) | 0.447 (1.87) |
| PerManana_2 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | |
| PerNoche_1 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | 0.0348 (0.15) |
| PerNoche_2 | 0.984 (6.02) | 0.958 (5.23) | |
| PerTarde_1 | -0.847 (-3.72) | -0.816 (-3.45) | 0.557 (2.35) |
| PerTarde_2 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | |
| PresSem_1 | -1.21 (-3.95) | -1.200 (-4.05) | 0.804 (5.09) |
| PresSem_2 | -0.988 (-5.76) | -0.987 (-5.76) | |
| CrucePeatDem_1 | 0.633 (1.85) | 0.620 (1.88) | -0.371 (-2.04) |
| CrucePeatDem_2 | 0.431 (1.94) | 0.433 (1.95) | |
| PuentePeat_1 | 3.220 (3.47) | 3.21 (3.50) | -0.86 (-2.92) |
| PuentePeat_2 | 3.030 (3.54) | 3.03 (3.55) | |
| SueloCom_1 | -4.960 (-7.95) | -4.89 (-7.96) | 3.90 (21.67) |
| SueloCom_2 | -4.149 (-20.8) | -4.13 (-20.8) | |
| SueloInd_1 | -1.360 (-3.14) | -1.370 (-3.28) | 0.792 (2.86) |
| SueloInd_2 | -1.620 (-5.18) | -1.610 (-5.15) | |
| VehBici_1 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | 0.0491 (0.13) |
| VehBici_2 | 0.913 (2.07) | 0.899 (2.07) | |
| VehBusoCam_1 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | -0.00254 (-0.01) |
| VehBusoCam_2 | -0.309 (-1.7) | -0.303 (-1.72) | |
| VehMoto_1 | 0.588 (2.64) | 0.590 (2.78) | -0.323 (-2.25) |
| VehMoto_2 | 0.506 (2.97) | 0.508 (3.01) | |
| VelMay40kmh_1 | 0.682 (3.38) | 0.636 (2.67) | -0.26 (-1.87) |
| VelMay40kmh_2 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | |
| AnchoAnden_1 | -1.90 (-5.17) | -1.86 (-4.95) | 0.977 (5.2) |
| AnchoAnden_2 | -1.38 (-4.88) | -1.38 (-4.90) | |
| ViaColect_1 | 0 (Fijo) | 0 (Fijo) | 0.184 (1.22) |
| ViaColect_2 | -0.478 (-3.25) | -0.46 (-2.99) | |
| Cte_Muertos_1 | 0.816 (1.75) | 1.06 (1.20) | 1.970 (6.16) |
| Cte_Heridos_2 | 3.46 (10.8) | 3.47 (10.9) | |
| Nido_1_2 | N/A | 1.09 (3.54) | N/A |
| Tau | N/A | N/A | 5.18 (42.02) |
| Numero de observaciones: | 2339 | | |
| Log verosimilitud inicial: | -2569.65 | | |
| Log verosimilitud final: | -1169.43 | -1169.39 | -1224.40 |

| Variable | MNL | NL | OL |
|--|-------|-------|-------|
| Rho Cuadrado ajustado: | 0.535 | 0.535 | 0.517 |
| _1, Muerto; _2, Herido; N/A: No aplica | | | |

Tabla 3. Pseudo-elasticidad promedio de las variables del modelo

| Variable | Elasticidades (%) | | |
|--------------|-------------------|----------|----------------------|
| | 1-Muerto | 2-Herido | 3-Solo daño material |
| Edad_60oMas | 149.26 | -10.94 | -5.20 |
| SexMascu | 167.87 | -6.17 | -3.10 |
| PerManana | -57.12 | 6.84 | 3.66 |
| PerNoche | -57.22 | 9.37 | -54.07 |
| PerTarde | -52.61 | 6.39 | 3.30 |
| PresSem | -18.96 | 0.26 | 135.68 |
| CrucePeatDem | 20.60 | 31.89 | -77.79 |
| PuentePeat | 53.27 | 31.89 | -77.79 |
| SueloCom | -70.02 | -31.73 | 4178.09 |
| SueloInd | 18.69 | -7.77 | 4178.09 |
| VehBici | -55.42 | 6.76 | -33.67 |
| VehBusoCam | 29.65 | -3.23 | 26.12 |
| VehMoto | 9.16 | 0.65 | -33.67 |
| VelMay40kmh | 82.32 | -5.17 | -2.53 |
| AnchoAnden | -37.85 | 2.69 | 252.84 |
| ViaColect | 48.96 | -5.15 | 43.02 |

Los resultados también sugieren que la probabilidad de sufrir accidentes con lesiones mortales para los individuos de género masculino se incrementa en un 168%. Este resultado es consistente con los hallazgos de Quddus et al. (2002), que encontraron que los hombres eran más propensos de sufrir daños más graves en accidentes en motocicletas que las mujeres. En la misma línea, Weiss et al. (2014) encontraron que el género se asoció significativamente con la gravedad de la lesión del accidente.

Aunque el día de la semana no resultó ser significativo, se encontró significancia del periodo del día en la severidad. La probabilidad de sufrir accidentes con sólo daños materiales en el periodo de la mañana es 57.12% mayor que la de sufrir accidentes con lesiones mortales. En la noche la probabilidad de tener accidentes con heridos es 9.37% mayor que la de tener accidentes con sólo daños materiales. Además, para el periodo de la tarde, al igual que en el periodo de la mañana, se encontró que los accidentes con lesiones mortales son menos probables que aquellos con sólo daños materiales.

Las características del control, como la presencia de semáforos, cruces peatonales y puentes peatonales, resultaron ser variables significativas que afectan la severidad de los accidentes. Cuando un semáforo está presente, la probabilidad de que se tengan lesiones mortales se reduce en 18.9%, mientras que la probabilidad de que no se tengan lesiones se aumenta en un 135.6%. Las lesiones fatales y las lesiones no fatales son más probables en aquellos sitios donde está presente el cruce peatonal, aumentando 20.6% y 31.8% respectivamente. Igualmente, la probabilidad de tener accidentes con muertos y heridos es mayor que la de tener accidentes con sólo daños materiales cuando en el lugar del accidente está presente un puente peatonal. En este caso, la probabilidad de lesiones fatales y lesiones no fatales se incrementa en un 53.27% y 31.89%, respectivamente.

Con respecto a las variables del ambiente, la estación climática y el estado de luminosidad resultaron ser no significativas en la severidad de los accidentes por lo cual se excluyeron del modelo final estimado. En cambio, el uso de suelo predominante sí afecta de manera significativa la severidad de las lesiones, en usos de suelo comercial e industrial, la probabilidad de sufrir lesiones mortales o no mortales disminuye 70% y 31.7%, respectivamente. Además, cuando predomina el uso de suelo industrial, las lesiones fatales y no fatales son menos probables.

Cuando están involucradas las bicicletas hay más probabilidad de sufrir lesiones no mortales que accidentes con sólo daños materiales. Por otra parte, los buses y camiones están asociados con severidades más leves. Además, las motocicletas son más propensas de tener accidentes con muertos o con heridos que accidentes con sólo daños. En este caso, los valores positivos de las elasticidades indican que las probabilidades de lesiones mortales y no mortales cuando en un accidente está involucrado una motocicleta, se incrementan en un 9.16% y 0.65% respectivamente. Estos resultados son consistentes con los encontrados por Abegaz et al. (2014).

En cuanto a las características de operación, la probabilidad de tener lesiones mortales cuando la velocidad es mayor que 40 km/h se incrementa en 82.32%. Este hallazgo es consistente con los resultados de Eluru et al. (2008), que indicaron que la propensión latente a lesiones es mayor para los accidentes que se producen en las carreteras con límites de velocidad más altos y en lugares distintos de las intersecciones señalizadas. El exceso de velocidad es visto como el factor más importante que contribuye a las lesiones causadas por accidentes de tránsito en muchos países; por lo tanto, la gestión de los límites de velocidad es una herramienta muy importante para mejorar la seguridad en las vías. Sin embargo, muchos conductores especialmente los motociclistas no reconocen los riesgos que implica y ven con frecuencia que los beneficios percibidos por el exceso de velocidad son mayores que los problemas que puedan resultar. Específicamente, en la ciudad de Cartagena, el fenómeno del mototaxismo se ha incrementado en los últimos años y las estadísticas muestran que en los accidentes con muertos o heridos cerca del 60% hay involucrado una motocicleta y en un alto porcentaje el exceso de velocidad es la causa del accidente.

Por último, los resultados del modelo indicaron que cuando el ancho de andén es mayor que 1 m, la probabilidad de sufrir lesiones mortales disminuye 37.8%, mientras que la probabilidad de sólo daños materiales se aumenta 252.8%. En el caso de vías colectoras, la probabilidad de lesiones no fatales disminuye en un 5.15% mientras que la probabilidad de sólo daños se incrementa en un 43.02%.

5. CONCLUSIONES

Se puede concluir que varios factores incrementan la probabilidad de sufrir lesiones fatales. Los conductores mayores de 60 años, los conductores masculinos, la presencia de cruces peatonales demarcados, la presencia de puentes peatonales, si el vehículo involucrado es una motocicleta, las velocidades mayores a 40 km/h, son factores que incrementan la probabilidad de sufrir lesiones fatales. Los resultados también indican que los accidentes ocurridos en periodos de la mañana o periodos de la tarde, en la presencia de semáforos, en zonas de uso de suelo comercial o industrial y en vías donde el ancho de andén es menor que 1 metro o no existe, disminuyen la probabilidad de lesiones fatales.

La identificación de los factores influyentes en la severidad de los accidentes puede apoyar la elaboración de políticas y en general, la planificación de la seguridad vial. Como las velocidades mayores que 40 km/h aumentan la probabilidad de sufrir lesiones fatales, contramedidas eficaces para inducir a los conductores a respetar los límites de velocidad, tales como reductores de velocidad o sistemas de detección electrónica en puntos críticos, pueden ser utilizadas para contrarrestar este factor de riesgo.

En el caso de la incidencia que tienen las motocicletas, medidas como el control del fenómeno del mototaxismo y el fortalecimiento de las leyes de uso obligatorio de los elementos de protección para los motociclistas pueden aplicarse para reducir las lesiones fatales en este tipo de vehículos. Igualmente, dado que en la noche hay mayor probabilidad de que se presenten accidentes con lesiones, medidas como la mejora de la iluminación e instalación de señales de advertencia se pueden utilizar para reducir eficazmente la prevalencia de este tipo de accidentes.

REFERENCIAS

- ABDEL-ATY, M. (2003). *Analysis of driver injury severity levels at multiple locations using ordered probit models*. Journal of Safety Research 34 (5), pp. 597-603.
- ABDEL-ATY, M. Y ABDELWAHAB, H. (2004). *Analysis and prediction of traffic fatalities resulting from angle collisions including the effect of vehicles' configuration and compatibility*. Accident Analysis & Prevention 36 (3), pp. 457-469.
- ABEGAZ, T., BERHANE, Y., WORKU, A., ASSRAT, A. Y ASSEFA, A. (2014). *Effects of excessive speeding and falling asleep while driving on crash injury severity in Ethiopia: A generalized ordered logit model analysis*. Accident Analysis & Prevention 71, pp. 15-21.

- BIERLAIRE, M. (2008). *Estimation of discrete choice models with BIOGEME 1.6*. biogeme.epfl.ch.
- CHANG, L. Y MANNERING, F. (1999). *Analysis of Injury Severity and Vehicle Occupancy in Truck-and Non-Truck-Involved Accidents*. *Accident Analysis and Prevention* 31 (5), pp. 579–592.
- ELURU, N. Y BHAT, C. (2007). *A joint econometric analysis of seat-belt use and crash-related injury severity*. *Accid. Anal. Prev.* 39 (5), pp. 1037–1049.
- ELURU, N., BHAT, C. Y HENSHER, D. (2008). *A Mixed Generalized Ordered Response Model for Examining Pedestrian and Bicyclist Injury Severity Level in Traffic Crashes*. *Accident Analysis and Prevention* 40 (3), pp. 1033–1054.
- GKRITZA, K. Y MANNERING, F. (2008). *Mixed logit analysis of safety-belt use in single- and multi-occupant vehicles*. *Accident Analysis & Prevention* 40 (2), pp. 443–451.
- GREENE, W.H. (1997). *Econometric Analysis*. 3rd ed., Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- HABTEMICHAEL, F.G. Y DE PICADO-SANTOS, L. (2013). *The impact of high-risk drivers and benefits of limiting their driving degree of freedom*. *Accid. Anal. Prev.* 60, pp. 305–315.
- HALEEM, K. Y ABDEL-ATY, M. (2010). *Examining traffic crash injury severity at unsignalized intersections*. *Journal of Safety Research* 41, pp. 347–357.
- HALEEM, K. Y GAN, A. (2015). *Contributing factors of crash injury severity at public highway-railroad grade crossings in the U.S.* *Journal of Safety Research* 53, pp. 23–29.
- HOLDRIDGE, J., SHANKAR, V. Y ULFARSSON, G. (2005). *The Crash Severity Impacts of Fixed Roadside Objects*. *Journal of Safety Research* 36 (2), pp. 139–147.
- ISLAM, S. Y MANNERING, F. (2006). *Driver aging and its effect on male and female single-vehicle accident injuries: Some additional evidence*. *Journal of Safety Research* 37 (3), pp. 267–276.
- JANG, K., PARK, S. H., CHUNG, S. Y SONG, K. (2010). *Influential factors on level of injury in pedestrian crashes: Applications of ordered probit model with robust standard errors*. 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C.
- KEMAL, A. Y OKTAY, E. (2014). *A multinomial logit analysis of risk factors influencing road traffic injury severities in the Erzurum and Kars Provinces of Turkey*. *Accident Analysis & Prevention* 72, pp. 66–77.
- KIM, J-K, KIM, S., ULFARSSON, G. F. Y PORRELLO, L. A. (2007). *Bicyclist injury severities in bicycle–motor vehicle accidents*. *Accident Analysis & Prevention* 39 (2), pp. 238–251.
- KIM, J-K, ULFARSSON, G.F., SHANKAR, V.N. Y MANNERING, F.L. (2010). *A note on modeling pedestrian-injury severity in motor-vehicle crashes with the mixed logit model*. *Accident Analysis & Prevention* 42 (6), pp. 1751–1758.
- KOCKELMAN, K. Y KWEON, Y. (2002). *Driver injury severity: an application of ordered probit models*. *Accident Analysis and Prevention* 34, pp. 313–321.
- LEE, J. Y MANNERING, F. (2002). *Impact of roadside features on the frequency and severity of run-off-roadway accidents: an empirical analysis*. *Accident Analysis and*

Prevention 34, pp. 149-161.

MALYSHKINA, N. Y MANNERING, F. (2009). *Markov switching multinomial logit model: An application to accident-injury severities*. Accident Analysis & Prevention 41 (4), pp. 829-838.

McFADDEN, D. (1981). *Econometric models of probabilistic choice*. En Manski, C., McFadden, D. (Eds.), *Structural Analysis of Discrete Data with Econometric Applications*. MIT press, Cambridge, MA.

MILTON, J., SHANKAR, V. y MANNERING, F. (2008). *Highway accident severities and the mixed logit model: An exploratory empirical analysis*. Accident Analysis & Prevention 40 (1), pp. 260-266.

O'DONNELL, C.J. y CONNOR, D.H. (1996). *Predicting The Severity of Motor Vehicle Accident Injuries Using Models OF Ordered Multiple Choice*. Accident Analysis and Prevention 28 (6), pp. 739-753.

PAI, C-W, HWANG, K.P. Y SALEH, W. (2009). *A mixed logit analysis of motorists' right-of-way violation in motorcycle accidents at priority T-junctions*. Accident Analysis & Prevention 41 (3), pp. 565-573.

PATIL, S., REDDY, S. Y LORD, D. (2012). *Analysis of crash severities using nested logit model-Accounting for the underreporting of crashes*. Accident Analysis and Prevention 45, pp. 646-653.

QUDDUS, M., NOLAND, R. Y CHOR, H. (2002). *An analysis of motorcycle injury and vehicle damage severity using ordered probit models*. Journal of Safety Research 33, pp. 445-462.

SHANKAR, V. Y MANNERING, F. (1996). *An exploratory multinomial logit analysis of single-vehicle motorcycle accident severity*. Journal of Safety Research 27 (3), pp. 183-194.

SHANKAR, V., MANNERING, F. Y BARFIELD, W. (1996). *Statistical Analysis of Accident Severity on Rural Freeways*. Accident Analysis and Prevention 28 (3), pp. 391-401.

STONE, M. Y BROUGHTON, J. (2003). *Getting off your bike: cycling accidents in Great Britain in 1990–1999*. Accident Analysis & Prevention 35 (4), pp. 549-556.

ULFARSSON, G. Y MANNERING, F. (2004). *Differences in male and female injury severities in sport-utility vehicle, minivan, pickup and passenger car accidents*. Accident Analysis and Prevention 36, pp. 135-147.

VALENT, F., SCHIAVA, F., SAVANITTO, C., GALLO, T., BRUSAFERRO, S. Y BARBORE, F. (2002). *Risk factors for fatal road traffic accidents in Udine, Italy*. Acc. Anal. Prev. 34 (1), pp. 71–84.

WEISS, H.B., KAPLAN, S. Y PRATO, C. G. (2014). *Analysis of factors associated with injury severity in crashes involving young New Zealand drivers*. Accident Analysis & Prevention 65, pp. 142-155.

YAMAMOTO, T., HASHIJI, J. Y SHANKAR, V. (2008). *Underreporting in traffic accident data, bias in parameters and structure of injury severity models*. Accid. Anal. Prev. 40 (4), pp. 1320–1329.

YAN, X., RADWAN, E. Y ABDEL-ATY, M. (2005). *Characteristics of rear-end accidents*

at signalized intersections using multiple logistic regression model. Accident Analysis & Prevention 37 (6), pp. 983-995.

YE, F. Y LORD, D. (2014). *Comparing three commonly used crash severity models on sample size requirements: multinomial logit, ordered probit and mixed logit models. Anal. Methods Accid. Res.* 1, pp. 72–85.

WANG, X. Y ABDEL-ATY, M. (2008). *Analysis of Left-Turn Crash Injury Severity by Conflicting Pattern Using Partial Proportional Odds Models. Accident Analysis and Prevention* 40 (5), pp. 1674–1682.

YASMIN, S. Y ELURU, N. (2013). *Evaluating alternative discrete outcome frameworks for modelling crash injury severity. Accid. Anal. Prev.* 59, pp. 506–521.

ZHANG, G., YAU, K.K.W. Y GONG, X. (2014). *Traffic violations in Guangdong Province of China: speeding and drunk driving. Accid. Anal. Prev.* 64, pp. 30–40.

57 A preliminary accident analysis of three Bus Rapid Transit cases in Mexico City

Vladimir Ávalos Bravo

Jaime Santos Reyes

Instituto Politécnico Nacional, Mexico City

ABSTRACT

The paper presents some preliminary results of three BRT (Bus Rapid Transit) accidents using the Events and Causal Factors Chart technique and the Barrier Analysis technique as approach. The case 1, relates to an accident where a pedestrian was crossing the street, and was hit by a BRT unit. In the case 2 an accident occurred when a BRT unit collides with a truck, and the case 3 involves a BRT unit that collides against another BRT unit when a gas supply impacts on it. Some of the findings related to the case 1 are a) the BRT's driver performance was "less than adequate"; b) the design layout of the pedestrian crossing was "less than adequate"; c) the BRT unit speed was "less than adequate". Some findings for the case 2: a) the truck's driver performance was "less than adequate"; b) the design layout of the intersection was "less than adequate"; c) the emergency response was adequate and timely in assisting the accident. And some findings for the case 3: a) the driver of the gas supply try to avoid a red light; b) the BRT's driver performance was "less than adequate"; c) the design layout of the intersection was "less than adequate"; d) the separation between the BRT's unit segregated way infrastructure was "less than adequate".

1. INTRODUCTION

In 2005, the Mexico City's Mayor inaugurated the first BRT system in the city, trying to emulate the Bogota's Colombia TransMilenio BRT system and its predecessor, the Transport Network BRT system in Curitiba, Brazil (Santos y Ávalos, 2014, Ávalos, 2014). The city of Curitiba, Brazil was the pioneer in BRT (Bus Rapid Transit) systems, and since then it had the acceptance on more than 150 cities worldwide where it was implanted.

The Institute for Transportation & Development Policy (ITDP) has proposed the following definition for the BRT systems (Wright y Hook, 2007):

"a high quality bus-based transit system that delivers fast, comfortable, and cost effective urban mobility through the provision of a segregated right-of-way infrastructure, rapid and frequent operations, and excellence in marketing and customer service".

Such systems carries an estimated amount of 28 million passengers each weekday; and some characteristics the performance and benefits of BRT systems are the following (Díaz, 2004): a) increased capacity; b) decreased travel time; c) increased reliability; d)

improved capital cost effectiveness, among others.

Such system is composed of 280 corridors, 4,300 km of routes, 6,700 stations, and 30,000 BRT units (BRTDATA.ORG, 2013).

A number of approaches have been taken to study the BRT systems; for example: Planning and Barriers to implement BRT systems, an environmental perspective (Cervero, 2013); traffic and delays of the BRT systems, a transit engineering perspective (Cervero et al., 2013); an economic perspective (Hensher & Golob, 2008, Lindau, et al, 2008) among others.

There are some publications regarding the safety of such systems, for example, the road safety improvements when the BRT system was implemented in Bogota (Colombia), with an 88% reduction in traffic fatalities on TransMilenio corridors (Peña & Rivas, 2011, Ponnaluri, 2011, Cahill & Casas, 2012). However, there is no evidence of studies conducted explicitly in analysis of accidents related to BRT systems. The paper gives an account of an ongoing research project concerning to the analysis of accidents associated with BRT systems in Mexico City with Events and Causal Factors Chart and the Barrier Analysis Technique.

2. RESEARCH METHODOLOGY

2.1 Events and Causal Factors Chart

Events and Causal Factors Chart technique is useful in identifying the multiple causes and graphically depict the triggering conditions and events necessary and sufficient for an accident to occur (Johnson, 2002). It is a graphical display of the accident's chronology and is used primarily for compiling and organizing evidence to illustrate the sequence of the accident's event.

2.2 Barrier Analysis

Some of the key concepts used in Barrier Analysis are: 'energy', 'hazard', 'barrier' and 'target'. A 'hazard' may be regarded as the potential for an unwanted 'energy' flow to result in an accident or other adverse consequence. 'Energy' flow is the transfer of energy from its source to a destination, overall Barrier Analysis is based on the premise that 'hazards' are associated to all accidents (Johnson, 2002).

3. THE BRT ACCIDENTS

In 2002 the Mexico City government planned a BRT corridor running across the center of Mexico's Capital. The first corridor of Metrobus-BRT was launched on June 19th, 2005 along one of the main avenues of the city with 20 km long. It is believed that the Metrobus-BRT has improved mobility by 50%, reduced accidents by 30% and encouraged a modal shift from private vehicles to public transport (Avalos, 2014). Based on its success, a second

corridor was opened on December, 16th, 2009, followed by the Line 3 which started to operate on February, 8th, 2011; the Line 4 started to operate on April, 4th, 2013 and the last corridor, the Line 5 started to operate on November, 5th, 2013. Further extensions are already planned and in construction (Avalos, 2014). According to the official figures by the BRT system operator, there were 872 accidents from 2005 to 2014, 96 accidents per year (Avalos, 2014).

3.1 Case 1: An accident where a pedestrian was crossing the street, and was hit by a BRT unit

On Friday, March 15, 2013, a Metrobus-BRT unit stopped at Hamburgo station and intended to continue its journey to the next station. To continue with its trip, it should have gone straight ahead on the Insurgentes Ave. to reach the next station, when suddenly a pedestrian, who was not crossing on the pedestrian crossing but was walking among the cars that were stopped on Insurgentes Ave., was hit by the BRT-Metrobus unit number 005 (Avalos, 2014). As a result, the pedestrian died and the body was dragged almost 10 meters; soon after, the police arrived to collect the evidence and the ambulance assisted the injured people who was riding on the BRT-Metrobus unit. The figure 2 shows some pictures of the accident.

3.2 Case 2: An accident where a BRT collides with a truck

On Wednesday, July 16, 2014, an accident occurred at approximately 11:50 am, a BRT-Metrobus unit and a truck collided in a junction between Congreso de la Union Ave. and Heroes de Nacozari Ave. (Avalos, 2014). The truck had a break failure when it was riding on Congreso de la Union Ave., and could not stop to avoid hitting a BRT- Metrobus unit, which was crossing the intersection to reach the next station; then it was projected against a car. Figures 3 and 4 show some pictures of the accident.

3.3 Case 3: A BRT unit collides against another BRT unit when a gas supply vehicle impacts it

On Wednesday, July 11, 2012, an accident occurred at approximately 15:00 am, a BRT-Metrobus unit collided with another BRT-Metrobus unit at the junction between Congreso de Union Ave. and Heroes de Nacozari Ave., because a gas supply impacts and projects it (Avalos, 2014). The gas supply vehicle was driven by a worker of the gas company. The worker trying to avoid the red light on Congreso de la Union Ave. and hit the BRT-Metrobus unit; invaded the segregated way of the other unit and crashing it (Avalos y Santos, 2015). Figures 5 and 6 show some pictures of the accident.

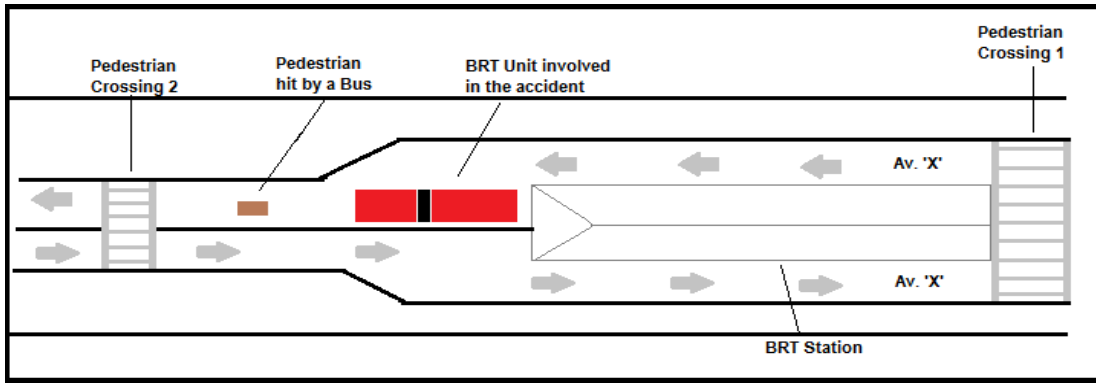


Figure 1. A schematic representation of the Metrobus-BRT accident Case 1



Figure 2. Pictures of some consequences of the BRT accident Case 1

Fuente: Avalos, 2014

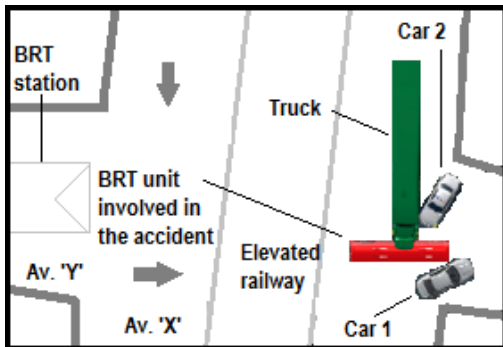


Figure 3. A schematic representation of the Metrobus-BRT accident: Case 2



Figure 4. Pictures of some consequences of the BRT accident: Case 2

Fuente: Avalos, 2014

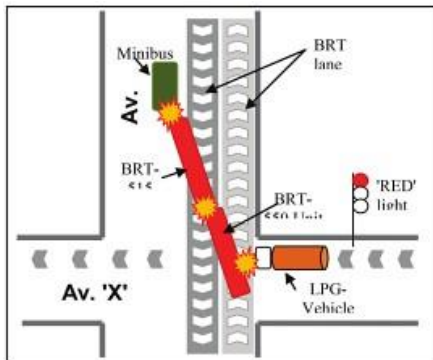


Figure 5. A schematic representation of the Metrobus-BRT accident Case 3

Fuentes: Avalos y Santos, 2015



Figure 6. Pictures of some consequences of the BRT accident: Case-3

Fuente: Avalos, 2014

4. ANALYSIS AND DISCUSSION

In order to conduct the analysis of the three case studies described briefly in the previous section, an exhaustive literature review was conducted in the manner that collect data about the accident. Given that there is no information available, most of the data of the presented case study has been gathered by consulting newspaper sites, and interviews with key persons involved in the running of the system (Avalos, 2014). In the subsequent sections, the result of the case studies is discussed.

4.1 Case 1. An accident where a pedestrian was crossing the street and was hit by a BRT unit

The table 1 shows a summary of the Barrier Analysis applied for this case study. It identified many deficiencies, for example, the speed of the BRT unit was considered as a barrier in the analysis. However, when conducting the analysis with the available information, it was found that the speed limit in the zone of the accident was limited to 20 km/h because the BRT station was between two pedestrian crossings; i.e. “failed”. But the question arises as, if the BRT unit speed limit was 20 km/h, why the BRT driver drives at 50 km/h? Effectively, if the speed of the BRT were less than 50 km/h the death of the pedestrian could have been avoided. In a similar way, the pedestrian crossing design was considered as a barrier in the analysis.

Once the Barrier Analysis was completed, the Events and causal Factors Chart technique

was applied. The preliminary results of the accident by applying the before mentioned technique with the available collected evidence is shown in Figure 7. Overall, the chart shows the sequence of the ‘events’ leading to the accident and the ‘conditions’ affecting these. Figure 7 also shows two ‘primary’ event sequences prior the accident; for example, the first ‘primary’ event intends to illustrate the event when the BRT unit leaves the station, apparently at this stage everything was working well; i.e., the brakes and lights were operational, and the driver did not report anything unusual. Also, the ‘conditions’ associated to the ‘primary’ events are identified; for example, the ‘condition’ for the first ‘primary’ event is associated with the knowledge and experience of the BRT driver. This is crucial in accidents investigation because it helps to identify possible deficiencies or contributing causal factors to the accident. Similarly, the second ‘primary’ event shows the ‘condition’ where the speed limit was not respected.

It is interesting to note that one of the relevant aspects of the ‘conditions’ is associated to the Mexico City transit regulation. It is well known that accidents as the presented case are not result from a unique cause, but they are systemic (Beard y Santos, 2009). It can also be argued that at least the human factor is present in almost all presented accidents.

It is believed that, the number of crashes increases as the number of decisions required of the driver (TRB, 1990). In the present case, it can be argued that the pedestrian who lost his life in the accident was not aware of the danger of walking among cars (Avalos, 2014). Given this, the following question arises: do the BRT corridors, such as the present case, consider the pedestrian element? (AASHTO, 2001) This requires further analysis.

4.2 Case 2. An accident where a BRT collides with a truck

Similarly, the analysis for the case 2 was done as case 1. Some of the key events of case 2 are shown in Table 2. This is a summary of the Barrier Analysis applied to this case study. Many deficiencies were observed. For example, “the speed of the truck that impacted the BRT-Metrobus unit” was considered a barrier in the analysis. However, when conducting the analysis with the available information, it was found that the truck driver did not keep their sight on the right side, respecting the red light and speed limit; he did not pay attention to the intersection, i.e. “failed”.

Figure 8 shows the event sequences during the collision; i.e. those associated to the truck impacting another vehicle. Another ‘secondary’ event is associated with the BRT unit that crashes with another vehicle because of the impact of the truck. This section of the chart illustrates the circumstances that contributed to the collision.

4.3 Case 3. A BRT unit collides against another BRT unit when a gas supply vehicle impacts on it

Table 3 shows the result of the Barrier Analysis for this case study. The identified barriers were associated to: a) an adequate speed restriction; b) the braking system of the gas supply

vehicle; c) the red light; and d) human factors regarding the driver; i.e. the gas supply driver's competence and his maneuvering ability.

Table 1. Barrier analysis of the BRT accident Case 1

| What are the barriers? | How did the barrier perform? | Why did the barrier failed? | How did the barrier affect the accident? |
|--|-------------------------------------|--|--|
| Braking of the BRT unit | Not applicable | Apparently, the driver applied the brakes, but because of the speed couldn't stop on time the BRT unit | If the BRT unit had stopped, the fatalities and injured would have been avoided |
| Pedestrian crossing | Failed | There was not paint enough on the road to mark the pedestrian crossing | If the pedestrian crossing was completely visible, the pedestrian would have avoided crossing among cars |
| Maneuvering ability of the BRT driver | Failed | The BRT driver could not avoid the pedestrian because he was driving at 50 km/h | If the speed was 20km/h, the accident would have been avoided |
| Competence of the BRT driver | Failed | The drivers action was less than adequate; e.g., he failed to keep up the sight and brake immediately | If the driver had enough knowledge about how to operate the BRT unit, the accident would have been avoided |
| Other design components of the BRT infrastructure (pedestrian bridges, segregated way protections, etc.) | Not applicable | According to reports about the accident, the design infrastructure of the BRT did not have to do to avoid the accident | It did not contribute to the accident |

Table 2. Barrier analysis of the BRT accident: Case 2

| What are the barriers? | How did the barrier perform? | Why did the barrier failed? | How did the barrier affect the accident? |
|--|-------------------------------------|--|---|
| Speed of the truck | Failed | The speed of the truck was not appropriated because of the amount of vehicle intersections on the main avenue. | If the driver of the truck had decreased the speed of the vehicle, he would have avoided the impact |
| Braking of the truck | Failed | Apparently, the driver applied the brake, but it failed | If the truck would have stopped, would have avoided the crash and the injured |
| Driver of the truck's competence | Failed | The drivers action was less than adequate; e.g., he failed to keep up the sight and brake immediately | If the driver had enough knowledge about how to operate the truck, the accident could have been avoided |
| Maneuvering ability of the BRT driver | Not applicable | The BRT driver could not avoid the impact because he was driving at 20 km/h | If the speed was over 20 km/h, the BRT driver could have produced another accident |
| Competence of the BRT driver | Not applicable | The drivers action was adequate; e.g., he did not fail to keep up the sight | If the driver had waited for a few minutes, he could bring a delay on the following BRT units |
| Other design components of the BRT infrastructure (pedestrian bridges, segregated way protections, etc.) | Not applicable | According to reports about the accident, the design infrastructure of the BRT did not have to do to avoid the accident | It did not contribute to the accident |

Table 3. Barrier analysis of the BRT accident. Case 3

| What are the barriers? | How did the barrier perform? | Why did the barrier failed? | How did the barrier affect the accident? |
|--|-------------------------------------|---|---|
| Maintain an adequate speed restriction on vehicles | Failed | Apparently, the gas supply vehicle was travelling at high speed and failed to stop at the intersection where the BRT unit was | If the truck driver had decreased the speed, he could have avoided the impacts |
| Braking of the gas supply | Not applicable | There was not enough time to apply brakes before the collision | Not applicable |
| Maneuvering ability of the gas supply driver | Failed | There was not time enough to stop the vehicle | It brought a collision with the BRT-515 unit |
| Gas supply vehicle stops at the red light | Failed | The gas supply driver ignored the red light and continued on the bus way | It brought a collision with the BRT-515 unit |
| Gas supply driver competence | Failed | The driver's performance was less than adequate | It brought a collision with the BRT-515 unit |
| Other design components of the BRT infrastructure (segregated way protections, etc.) | Failed | The design infrastructure of the BRT was less than adequate to avoid the accident | With a protection wall between the segregated ways, the BRT-515 unit had avoided the crash against the other BRT unit |

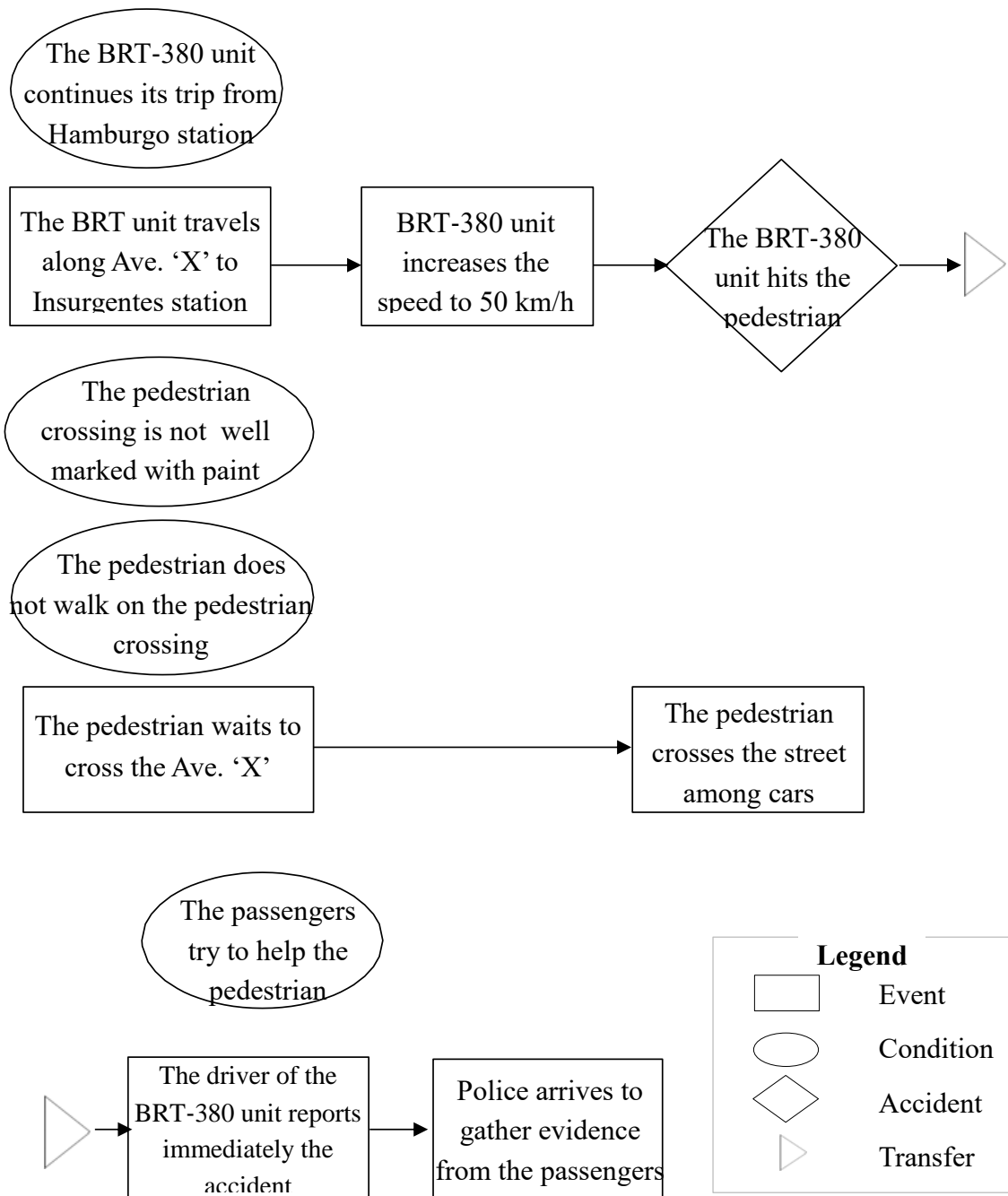


Figure 7. A preliminary analysis of a BRT accident. Case-1

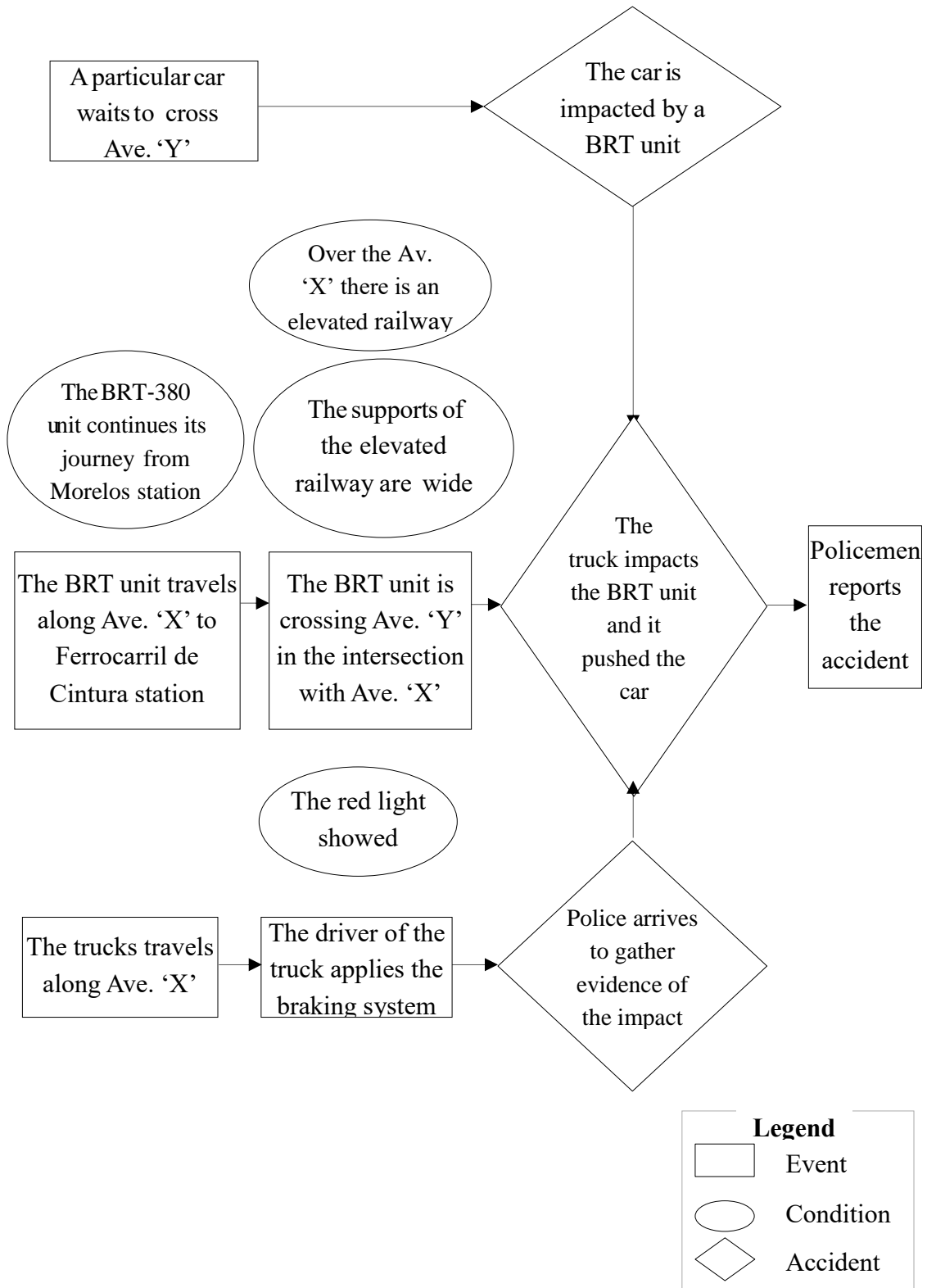


Figure 8. A preliminary analysis of a BRT accident. Case 2

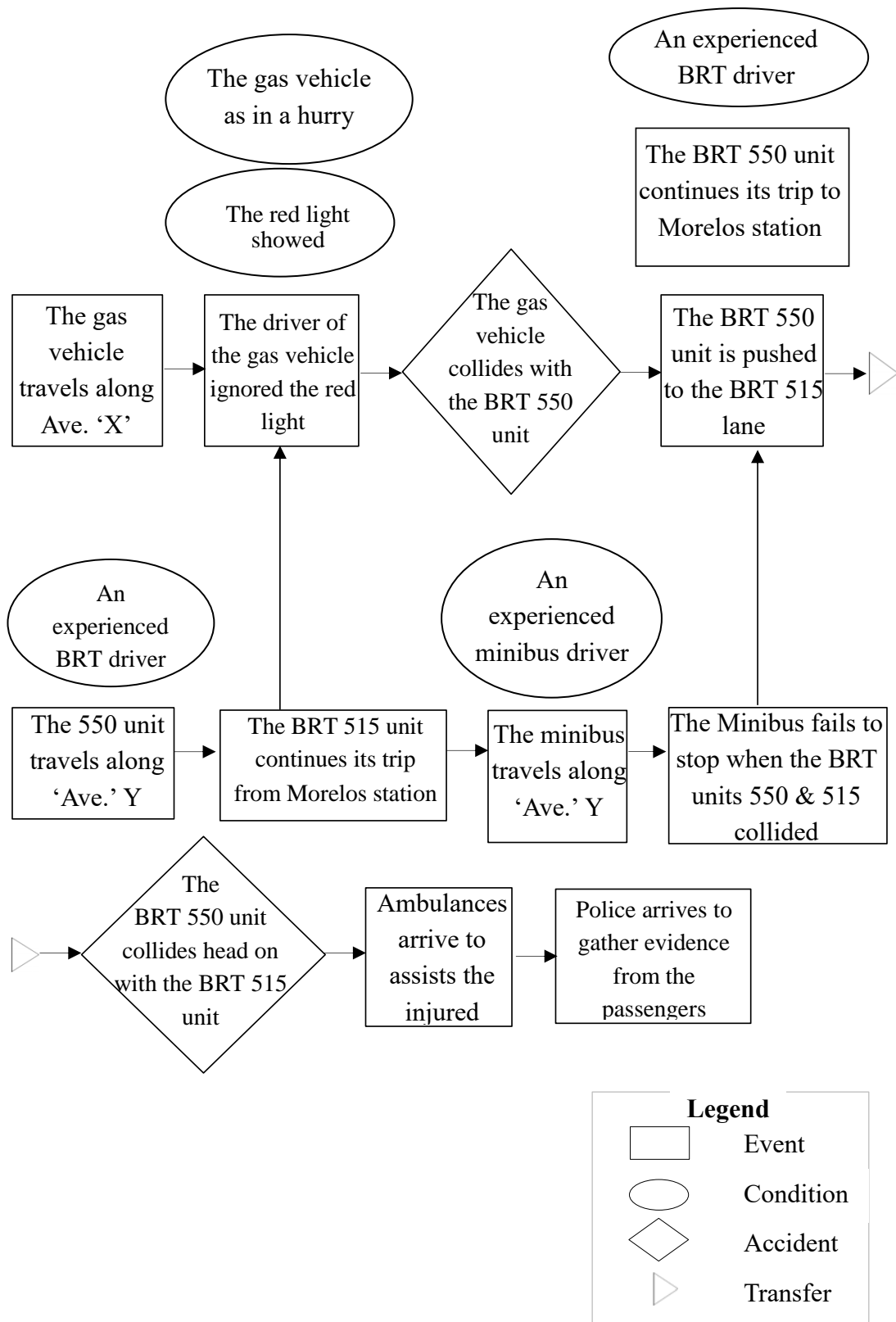


Figure 9. A preliminary analysis of a BRT accident. Case-3

5. CONCLUSION

The paper presents some preliminary results of three BRT accidents. The approaches used in the case studies were two accident analysis techniques, the Barrier Analysis and the Events and Causal Factors Chart. These tools may be enough to analyze BRT related accidents. However, other approaches can be applied in order to ‘validate’ the results presented here. Some key findings for each case are the following:

- a) Case 1. A pedestrian was crossing the street, when was hit by a BRT unit.
 - The competence of the BRT driver was less than adequate, because he did not respect the rules established by the Transit Regulation of Mexico City.
 - The performance of the BRT driver was less than adequate, because the speed of the BRT was over 20 km/h.
 - The pedestrian crossing failed because was not well painted to mark it.

- b) Case 2. A BRT collides with a truck.
 - The speed of the truck was not appropriated. If the driver had decreased the speed, he could have avoided the impact.
 - The braking system of the truck was less than adequate, apparently, the driver of the truck applied it but it failed.
 - The emergency response was adequate and timely in assisting the injured.

- c) Case 3. A BRT unit crashes another BRT unit when a gas supply vehicle impacts it.
 - The speed of the gas vehicle was not appropriated.
 - The driver of the BRT-550 unit did not expect the impact of the gas vehicle.
 - The design layout of the station, in this case, the segregated way was less than adequate.

ACKNOWLEDGEMENTS

This project was funded under the following grant: SIP-IPN: No-20161496.

REFERENCES

- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS, AASHTO (2001). *A policy on geometric design of highways and streets*. AASHTO.
- AVALOS, V., (2014). *Reporte de tesis Doctoral*. Departamento de Ingeniería de Sistemas, SEPI-ESIME, IPN, Mexico.
- AVALOS, V., AND SANTOS, J. (2015) *Accident Analysis of Bus Rapid Transit units in Mexico City*. Safety and Reliability of Complex Engineered Systems, Podofilini, et al. (Eds) Taylor & Francis group, London, ISBN 978-1-138-02879-1 pp.7-12

- BEARD, A.N., SANTOS, J. (2009). *A systemic analysis of the Edge-Hill railway accident*. Accident Analysis and Prevention; 41(6): 1133-1144.
- BRTDATA.ORG. (2013). Accessed July 24-25, 2013.
- CAHILL, E., AND CASAS, I., (2012). *Evaluating the spatial equity of bus rapid transit-based accessibility patterns in a developing country: The case of Cali, Colombia*. Transport Policy; 20: 36-46.
- CERVERO, R., (2013). *Bus rapid transit (BRT): An efficient and competitive mode of public transport*. Working paper 2013-01. Institute of Urban and Regional Development. University of California, USA.
- CERVERO, R., LUCHI, K., AND SUZUKI, H., (2013). *Transforming cities with transit: transit and land-use integration for sustainable urban development*. Washington, D.C: World Bank, USA.
- JOHNSON, C.W., (2002). *Reasons for the failure of incident reporting in the healthcare and rail industries* In F. Redmill and T. Anderson, editors, UK.
- PONNALURI, R.V., (2011). *Sustainable Bus Rapid Transit initiatives in India: The role of decisive leadership and strong institutions*. Transport Policy, 18: 269-275.
- SANTOS, J. AND ÁVALOS, V. (2014). *A preliminary analysis of two Bus Rapid Transit accidents in Mexico City 2014* International Symposium Safety Science and Technology ELSEVIER Procedia Engineering 84, pp. 624-633
- TRANSPORTATION RESEARCH BOARD, TRB (1990). *Human Factors and Safety Research Related to Highway Design and Operations, Transportation Research Record 1281*.
- WRIGHT, L. AND HOOK, W. (2007). *Bus rapid transit planning guide*. New York: Institute of Transportation & Development, USA.

58 Validación de la aplicabilidad de la metodología del Highway Safety Manual-2010 (HSM-2010) para la predicción del número de accidentes de tránsito en vías multicarril en la ciudad de Bogotá

Stefany Ramírez Hurtado

Yury Nathalia Ruiz Tiria

Pontificia Universidad Javeriana, Colombia

RESUMEN

Diferentes estudios relacionados con la predicción del número de accidentes de tránsito se han desarrollado a lo largo de los años, sin embargo, no se han empleado en el diseño de la infraestructura vial de Bogotá, como un requisito para determinar la viabilidad de su construcción, o bien para la adecuación de parámetros geométricos directamente ligados a la incidencia de un accidente como son: separador, iluminación, número de carriles y berma, ya que forman parte del entorno vial. En esta investigación se presenta la aplicación del modelo para predecir accidentes en las vías multicarril explícito en el capítulo 11 del Highway Safety Manual – 2010 (HSM-2010), se realiza un análisis de sensibilidad en el que se varían las condiciones geométricas y de lugar actuales, por unas características base y se comparan los accidentes para determinar los porcentajes de reducción que se darían si se modificaran las condiciones actuales de esos corredores. Se encontró una disminución en la cantidad de accidentes anuales a partir del modelo calibrado con anterioridad a las condiciones locales. Adicionalmente, la investigación fue evaluada con la escala de severidad KABCO como lo incluye el modelo predictivo, y se obtuvo la cantidad de accidentes que se catalogan según la gravedad, de herido y muerte.

Palabras claves: Accidentalidad, vías multicarril, seguridad vial.

1. INTRODUCCIÓN

El diseño geométrico de la infraestructura vial como ejercicio de ingeniería civil, ha tenido un enfoque basado principalmente en el volumen de tráfico y la velocidad de la vía, con los cuales se determinan las dimensiones de ancho de carril, de berma y de separador; más no se ha tenido en cuenta en el diseño, la seguridad vial. La accidentalidad es un elemento de gran importancia que debería analizarse a través de un modelo predictivo, evaluar sus costos y compararlos con el valor de una infraestructura vial diseñada con las condiciones favorables para reducir la cantidad de accidentes de tránsito que se registran anualmente. Pero esto no se encuentra actualmente, como una especificación de evaluación para

determinar la viabilidad de la construcción de la vía en el entorno local de la ciudad de Bogotá.

Es importante y pertinente para los estudios y diseños de la infraestructura vial en la ciudad de Bogotá, determinar la relación que existe entre los parámetros geométricos y de lugar en las vías multicarril, para cuantificar los accidentes de tránsito que se producen en éstas y determinar así, las posibles reducciones en accidentalidad si se llegase a intervenir la vía. De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se identificaron las vías multicarril que poseen tramos que sí cumplen con los parámetros del Highway Capacity Manual- 2010 (American Association of State Highway and Transportation, 2010a) en la capital del país, como son la Avenida NQS (Norte Quito Sur), la Avenida El Dorado, la Autopista Norte, la Avenida de Las Américas y la Avenida Boyacá. Estos corredores comparten la infraestructura con el transporte masivo TransMilenio.

Los accidentes son ocasionados por la variedad de factores geométricos de la infraestructura, el ambiente, las velocidades de operación, el comportamiento humano, entre otros, lo que genera incertidumbre en modelos que son netamente cuantitativos, pues los accidentes son eventos complejos. Por ello se propone un diseño y evaluación integral de los proyectos viales que se planean realizar en un futuro. La importancia de este análisis de seguridad vial radica en el conocimiento que se tendrá de los factores de la infraestructura que pueden llegar a incidir en la accidentalidad, no sólo con propósitos investigativos sino también como una necesidad de aplicación de modelos predictivos en la etapa de diseño, construcción y operación de las vías locales para mitigar la cantidad de accidentes futuros.

Brasil es el único país de Latinoamérica que ha realizado estudios de métodos predictivos de accidentes de tránsito en vías urbanas. Pero ningún otro país de la región aplica estos modelos para cuantificar los accidentes durante el diseño de vías. En Oregon, Estados Unidos, se aplicaron los métodos predictivos del HSM-2010 (American Association of State Highway and Transportation, 2010b) a un caso de estudio y encontraron que las funciones de desempeño de seguridad aplican para la estimación del número de accidentes de tránsito, lo que valida la metodología. Adicionalmente en la ciudad de Missoula en el estado de Montana, se validaron los “Crash Modification Factors” (*CMF*) o factores de modificación de accidentes que presenta el modelo, es decir que al igual que en las vías multicarril de la ciudad de Bogotá, se obtienen reducciones de la estimación del número de accidentes de tránsito.

Esta investigación predijo el patrón de modificación de accidentes en años futuros para vías multicarril de la ciudad de Bogotá, a partir de un modelo establecido por el Highway Safety Manual – 2010, que requirió determinar unos parámetros geométricos de la vía y características propias del lugar, además de involucrar coeficientes de regresión y un factor de calibración. Previamente, en la investigación se analizó la base de datos de accidentalidad en los corredores multicarril junto con el Tránsito Promedio Diario, y así se determinó cuáles

de estas características influyen para la estimación de los accidentes de tránsito en las condiciones locales.

Finalmente, el resultado obtenido acerca de la estimación del número de accidentes de tránsito en los años futuros se comparó con unas condiciones base de la geometría y características del lugar para evaluar el efecto de modificaciones a la infraestructura actual y así se determinó el porcentaje de reducción que se tendría en un futuro.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación utilizó la metodología del capítulo 11 “Predictive Method for Rural Multilane Highways” del Highway Safety Manual-2010 (HSM-2010). Adicionalmente se utilizaron las bases de accidentalidad y volúmenes de tráfico de la Secretaría de Movilidad de Bogotá (Instituto Nacional de Vías, 2008).

3. RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la validación de la aplicabilidad del método predictivo del número de accidentes para las vías multicarril, expuesto en el capítulo 11 del HSM-2010.

3.1 Factor de calibración Cx para años futuros

Una vez definidos los factores de calibración Cx para los años 2000 a 2014 para los corredores multicarril, se estimaron los valores de los Cx de los años futuros, que comprenden entre el 2015 al 2020 y el año 2025. El factor de calibración se calculó con base en la tendencia, considerando los factores de calibración que se obtuvieron en cada segmento de los corredores en los años anteriores.

3.2 Aplicación del modelo para accidentes de años futuros en intersecciones (2015 – 2020)

En los tramos multicarril de Bogotá se evaluaron las intersecciones para determinar si cumplían con los criterios del modelo. Se obtuvieron 4 intersecciones de cuatro brazos semafóricos (4SG) ubicadas en la Avenida Boyacá con calle 53, Avenida Boyacá con calle 12, en la Avenida de Las Américas con carrera 43A y en Avenida NQS con calle tres. No es necesario calibrar el modelo de intersecciones, ya que involucra factores como el tránsito promedio diario, que es un parámetro propio de la vía y los coeficientes de dispersión. Los resultados se presentan en las Tablas 1 a 4.

Tabla 1. Número de accidentes pronosticados para la Intersección Av. Boyacá con calle 53

| Intersección 4SG Avenida Boyacá con Calle 53 | | | |
|--|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| Año | N° accidentes (Total) | N° accidentes (muerte y lesión) | N° accidentes (simple) |
| 2015 | 150 | 37 | 113 |
| 2016 | 258 | 40 | 218 |
| 2017 | 323 | 40 | 283 |
| 2018 | 346 | 42 | 304 |
| 2019 | 357 | 43 | 314 |
| 2020 | 369 | 45 | 324 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Número de accidentes pronosticados para la Intersección Av. Boyacá con calle 12

| Intersección 4SG Avenida Boyacá con Calle 12 | | | |
|--|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| Año | N° accidentes (Total) | N° accidentes (muerte y lesión) | N° accidentes (simple) |
| 2015 | 124 | 38 | 86 |
| 2016 | 128 | 39 | 89 |
| 2017 | 264 | 42 | 222 |
| 2018 | 333 | 43 | 290 |
| 2019 | 345 | 45 | 300 |
| 2020 | 356 | 46 | 310 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Número de accidentes pronosticados para la Intersección Av. NQS con calle 3

| Intersección 4SG Avenida NQS con Calle 3 | | | |
|--|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| Año | N° accidentes (Total) | N° accidentes (muerte y lesión) | N° accidentes (simple) |
| 2015 | 156 | 39 | 117 |
| 2016 | 160 | 40 | 120 |
| 2017 | 164 | 41 | 123 |
| 2018 | 173 | 44 | 129 |
| 2019 | 168 | 42 | 126 |
| 2020 | 176 | 44 | 132 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Número de accidentes pronosticados para la Intersección Av. Américas con carrera 43A

| Intersección 4SG Avenida de Las Américas con Carrera 43A | | | |
|--|-----------------------|---------------------------------|------------------------|
| Año | Nº accidentes (Total) | Nº accidentes (muerte y lesión) | Nº accidentes (simple) |
| 2015 | 113 | 25 | 88 |
| 2016 | 120 | 27 | 93 |
| 2017 | 126 | 29 | 97 |
| 2018 | 133 | 31 | 102 |
| 2019 | 140 | 32 | 108 |
| 2020 | 148 | 35 | 113 |

Fuente: Elaboración propia

3.3 Aplicación del modelo para accidentes de años futuros en segmentos. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad consiste en determinar el efecto que tendrá sobre el número de accidentes la modificación de las características geométricas y de lugar de cada vía. Se predijo el número de accidentes con las condiciones actuales de las vías. Adicionalmente, se variaron los parámetros de caracterización geométrica y de lugar, como lo son el ancho de carril, ancho de berma y control de velocidad. El ancho de separador no se modificó ya que la estructura vial de TransMilenio no lo permite; tampoco se modificó la iluminación porque es propia de la vía urbana.

El modelo del capítulo 11 del HSM-2010 puede ser evaluado según la escala KABCO, cuya letra “K” refiere accidentes fatales; la “A” corresponde a accidente con lesión de incapacidad; “B” implica lesión sin incapacidad; “C” posible lesión, diferente a las anteriores; y la letra “O” daños a la propiedad.

La base de accidentalidad no proporciona la información con la escala KABCO, sino que clasifica por tipo de gravedad, en simple-sólo daños, herido y muerto; por lo cual fue necesario definir un “K” para los accidentes que involucren muertes, “ABC” a los accidentes relacionados con lesión y “O” los accidentes simples-solo daños. Dado que el modelo no separa la gravedad herido y muerto, se depuró la base de accidentes que involucraron estos dos tipos de gravedad a lo largo de los últimos 15 años, para determinar su distribución, asignarla a los años futuros del 2015 al 2025, obtener por separado dichos accidentes y analizarlos de manera individual.

3.3.1 Análisis de sensibilidad para las vías multicarril de Bogotá

En las Tablas 5 a 9 se presentan los resultados de reducción de accidentes totales y clasificados por la gravedad, en función de tres combinaciones de variación de variables para los cinco corredores de la ciudad. La primera combinación deja el ancho de carril (AC) y de

berma (AB) de diseño y aplica el control automático de velocidad; la segunda combinación usa las condiciones reales de ancho de carril y ancho de berma para cada corredor sin control de velocidad automático; y finalmente, a la combinación anterior se agregó el control de velocidad automático.

Tabla 5. Reducción del número de accidentes pronosticados en Avenida Norte Quito Sur (2015-2025)

| | | AC=2.76m-3.31m AB=0.22m-0.35m Control automático de velocidad | AC=3.3m; AB=0.5m Sin control automático de velocidad | AC=3.3m; AB=0.5m Control automático de velocidad |
|------------|--------------------|--|---|--|
| Año | Gravedad | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) |
| 2015 | Total | N/A | 7,1 | N/A |
| | Herido y muerto | 6,0 | 4,8 | 12,7 |
| 2025 | <i>Herido</i> | 5,6 | 4,5 | 12,0 |
| | <i>Muerto</i> | 0,4 | 0,3 | 0,7 |
| | Simple | N/A | 2,3 | N/A |

Tabla 6. Reducción del número de accidentes pronosticados en Avenida El Dorado (2015-2025)

| | | AC=3.17m-3.60m AB=0.22m-0.35m; Control automático de velocidad | AC=3.6m; AB=0.6m Sin control automático de velocidad | AC=3.6m; AB=0.6m Control automático de velocidad |
|------------|--------------------|---|---|---|
| Año | Gravedad | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) |
| 2015 | Total | N/A | 3,0 | N/A |
| | Herido y muerto | 6,0 | 1,4 | 8,8 |
| 2025 | <i>Herido</i> | 5,0 | 1,2 | 7,8 |
| | <i>Muerto</i> | 1,0 | 0,2 | 1,0 |
| | Simple | N/A | 1,6 | N/A |

Tabla 7. Reducción del número de accidentes pronosticados en Autopista Norte (2015-2025)

| | | AC=3.20 m-3.65m; AB=0 m-2.1 m; Control automático velocidad | AC=3.45 m; AB=0.5 m; Sin control automático de velocidad | AC=3.45 m AB=0.5 m; Control automático velocidad |
|--------------|--------------------|--|--|---|
| Año | Gravedad | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) |
| 2015 2025 | Total | N/A | 2,7 | N/A |
| | Herido y muerto | 6,0 | 1,2 | 8,5 |
| | <i>Herido</i> | 5,3 | 1,1 | 7,5 |
| | <i>Muerto</i> | 0,7 | 0,1 | 1,0 |
| | Simple | N/A | 1,5 | N/A |

Tabla 8. Reducción del número de accidentes pronosticados en Avenida de Las Américas (2015-2025)

| | | AC=2.80 m-3.73m; AB=0.20 m-0.40m; Control automático de velocidad | AC=3.40 m; AB=0.5 m Sin control automático de velocidad | AC=3.40 m; AB=0.5 m; Control automático de velocidad |
|--------------|--------------------|--|---|---|
| Año | Gravedad | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) |
| 2015 2025 | Total | N/A | 4,2 | N/A |
| | Herido y muerto | 6,0 | 1,8 | 10,1 |
| | <i>Herido</i> | 5,8 | 1,7 | 9,8 |
| | <i>Muerto</i> | 0,2 | 0,1 | 0,3 |
| | Simple | N/A | 2,4 | N/A |

Tabla 9. Reducción del número de accidentes pronosticados en Avenida Boyacá (2015-2025)

| | | AC=3.5 m-3.60 m; AB=0.20m - 0.23 m Control automático de velocidad | AC=3.65 m; AB=0.8 m; Sin control automático de velocidad | AC=3.65 m; AB=0.8 m Con control automático de velocidad |
|--------------|--------------------|---|--|---|
| Año | Gravedad | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) | Reducción/año N° de accidentes (%) |
| 2015 2025 | Total | N/A | 4,0 | N/A |
| | Herido y muerto | 6,0 | 1,9 | 9,8 |
| | <i>Herido</i> | 5,7 | 1,8 | 9,3 |
| | <i>Muerto</i> | 0,3 | 0,1 | 0,5 |
| | Simple | N/A | 2,1 | N/A |

4. CONCLUSIONES

Se aplicó el modelo del HSM-2010 para estimar el número de accidentes en las vías multicarril en Bogotá, variando las características geométricas y de lugar ideales para las mismas. Las combinaciones de las variaciones empleadas resultaron del análisis de varias alternativas para cada una de las condiciones. Las combinaciones fueron evaluadas para comparar la cantidad de accidentes pronosticados con características ideales y los accidentes bajo las condiciones actuales, en todos los casos se obtuvo una reducción y se determinó cuál fue la combinación que mejor se adaptó a la realidad. La característica de control automático de velocidad sólo aplica para accidentes que involucran herido y muerto, pues la mayoría de estos accidentes son ocasionados por conducir a altas velocidades.

En el transcurso de los últimos 15 años, la Avenida NQS ha sido el corredor multicarril en el cual se ha registrado mayor número de víctimas que involucran heridos y muertos, con una cantidad promedio anual de 725 y 39 respectivamente, por lo cual es de gran importancia intervenirla a través de la modificación de sus características, con posibles escenarios de diseño para corto, mediano y largo plazo. Al comparar las condiciones geométricas y de lugar de la Avenida NQS se obtuvo una reducción de 7.1% anual en accidentes totales para los años 2015 a 2025 cuando se aplicaron las condiciones de ancho de carril de 3.3 m, ancho de berma de 0.5 m y sin control de velocidad. Estos accidentes totales pueden ocasionar gravedad simple que se reducirá un 2.3% y gravedad de herido y muerto cuyas reducciones serán de 4,5% y 0.3% anual, respectivamente. Cuando se aplicó el control automático de velocidad a las condiciones anteriores, se obtuvo una reducción del 12% anual en los accidentes que involucran heridos y de 0.7% anual en los que involucran muertos. La intervención necesaria de esta vía implicaría homogeneizar el ancho de carril a 3.3 m y el

ancho de berma a 0.5 m a lo largo del corredor multicarril. De no intervenir la vía, es decir dejando las condiciones de carril y berma actuales, pero aplicando el control automático de velocidad la reducción es menor, los accidentes que involucran heridos disminuyen un 5.6% anual y 0.4% los que involucran muertos. También se analizó un escenario con las condiciones ideales del modelo, es decir, un carril de 3.65 m y ancho de berma de 2.43 m, para las cuales se obtuvo una reducción en víctimas de 468 heridos y 14 muertos, para el año 2025.

La evaluación de la Avenida El Dorado para la combinación de un ancho de carril de 3.6 m, ancho de berma de 0.6 m y sin control de velocidad comparada con las características geométricas de lugar actuales, reduce un 1.6% los choques simples o sólo daños, 1.2% y 0.2% los accidentes relacionados con heridos y muertos respectivamente, y 3.0% los accidentes totales. Para las dimensiones de berma y carril citadas, con control automático de velocidad, la reducción de accidentes fue de 7.8% para heridos y 1% para muertos. La intervención necesaria de esta vía recomienda unificar el ancho de carril y berma a 3.6 m y 0.6 m respectivamente a lo largo de todos los segmentos multicarril. Una solución a corto plazo sugiere emplear sistemas de control automáticos de velocidad. Adicionalmente se evaluaron cuatro escenarios más, que podrán ser desarrollados a mediano y largo plazo para intervenciones futuras y permitirán reducciones de hasta 526 heridos y 66 muertos en el año 2025.

Aplicando las condiciones ideales de la Autopista Norte se encontró una reducción anual del 2.7% para accidentes totales, 1.1% y 0.1% para heridos y muertos respectivamente, y 1.5% para accidentes simples o sólo daños, estas condiciones fueron de 3.45 m para ancho de carril, 0.5m para la berma y sin control de velocidad, adicionalmente se evaluó este corredor aplicando el sistema automático para medir velocidad y la reducción fue del 7.5% y 1% de accidentes que involucran heridos y muertos, respectivamente. La intervención necesaria de esta vía implica unificar todos los segmentos a un ancho de carril de 3.45 m y un ancho de berma de 0.5 m, lo cual es viable debido a que la Autopista Norte posee el espacio requerido. Para no intervenir la vía y tener como resultado una disminución de accidentes es necesario implementar controles automáticos de velocidad los cuales arrojan un decrecimiento de accidentes del 5.3% para heridos y 0.7% para muertos. Al año 2025 se encontró una reducción anual de 485 heridos y 33 muertos, si se implementan las condiciones ideales que propone el modelo.

El análisis sobre la Avenida de Las Américas permitió pronosticar reducciones anuales de accidentalidad total del 4.2%, para accidentes de herido y accidentes de muerto de 1.7% y 0.1% respectivamente, y de 2.4% para accidentes simples aplicando condiciones ideales de 3.45 m de ancho de carril, 0.5m de ancho de berma y sin control de velocidad. Al utilizar control automático de velocidad como condición ideal para la vía, se obtuvo una reducción del 9.8% y 0.3% de los accidentes que involucran heridos y muertos, con las dimensiones de carril y berma expuestas anteriormente. Esta vía requiere que se unifique la medida del

ancho de carril y berma a 3.45 m y 0.5 m, respectivamente. La instalación de sistemas automáticos de control de velocidad permitiría en el corto plazo, contraer un 5.8% anual el número de accidentes que involucran heridos y 0.2% los accidentes con muertos. Intervenciones a mediano y largo plazo para la Avenida de Las Américas fueron evaluadas logrando una reducción de 245 heridos y 4 muertos anuales para el año 2025, con las condiciones ideales que presenta el modelo, de ancho de carril y berma de 3.65 m y 3.43 m respectivamente.

Por otra parte, se evaluó el modelo en la Avenida Boyacá para un ancho de carril de 3.65 m, ancho de berma de 0.8 m y sin control de velocidad, la reducción anual obtenida fue del 2.1% para choques simples o sólo daños, 1.8% y 0.1% para accidentes relacionados con heridos y muertos respectivamente, lo que significa una reducción de 4.0% del número total de accidentes. A esas medidas se agregó el control automático de velocidad y la reducción del número de accidentes con heridos y muertos fue de 9.3% y 0.5%, respectivamente. Se recomienda unificar el ancho de carril a 3.65 m y ancho de berma a 0.8 m, este espacio no está disponible la Avenida Boyacá, pero la inminente construcción de TransMilenio brinda la oportunidad para realizar estos cambios. Instalar sistemas automáticos de control de velocidad es una solución a corto plazo que reduciría los accidentes con heridos un 5.7% por año y 0.3% los accidentes con muertos. Las intervenciones de mediano y largo plazo involucran cuatro escenarios adicionales con un ancho de carril de 3.65 m, ancho de berma de 2.43 m, y con control de velocidad automático, que arrojarían anualmente descensos de hasta un 19% de los accidentes que involucran heridos y muertos. Adicionalmente, para el año 2025 se lograría una reducción de 148 heridos y 4 muertos por año, al implantar las condiciones ideales del modelo.

El modelo fue validado bajo las condiciones locales de Bogotá, ya que, al aumentar el ancho de carril, ancho de berma e implantar controles automáticos de velocidad en las vías multicarril, el comportamiento del número de accidentes decrece. La Avenida NQS presenta una mayor sensibilidad a la modificación del ancho de carril, ya que al aumentarlo disminuyen considerablemente los accidentes totales, mientras que la implantación del control automático de velocidad genera una disminución anual de los accidentes que involucran heridos y muertos. La Avenida El Dorado y La Autopista Norte responden más al ancho de berma y a la implementación de control automático de velocidad. La Avenida de Las Américas tiene una mayor sensibilidad al ancho de carril y a la implantación de sistemas automáticos de control de la velocidad. La Avenida Boyacá es más sensible a la variación del ancho de carril e implantación de controles automáticos de velocidad.

Para la calibración de los cinco corredores multicarril, se obtuvieron valores de Cx lejanos a 1, es decir que estas vías tienen en cuenta otros factores adicionales a los cinco que presenta el modelo: ancho de carril, berma y separador, iluminación y control de velocidad automáticos. El modelo relaciona factores geométricos de la vía, con la accidentalidad.

REFERENCIAS

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2010a). *Highway Capacity Manual-2010*, Glossary and Symbols.

AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS (2010b). *Highway Safety Manual-2010, Predictive Method for Rural Multilane Highways*.

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS - INVÍAS. (2008). *Manual de Diseño Geométrico de Carreteras*. Ministerio de Transporte. República de Colombia.

59 Elementos para una gestión efectiva de la seguridad vial en México

Alberto Mendoza Díaz

Nadia Gómez González

Instituto Mexicano del Transporte, México

RESUMEN

Al reemplazar el transporte impulsado por animales con el transporte automotor, la velocidad y la movilidad aumentaron. Al paso de los años, esta problemática se ha ido agravando en la medida en que la actividad vehicular ha aumentado en los diferentes lugares. Por las razones anteriores, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó por unanimidad en 2010 una resolución anunciando el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020. La meta para el Decenio es “para el año 2020, reducir a la mitad las muertes y lesiones causadas por accidentes viales”.

En nuestro país mueren anualmente alrededor de 20 mil personas en 400,000 accidentes viales, en los cuales también se generan del orden de 140,000 lesionados. México se adhirió a la convocatoria de las Naciones Unidas para el Decenio de Acción, lanzando en 2011 la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020. A pesar de contar con la Estrategia y de que en nuestro país se realizan cotidianamente diversas acciones de mejoramiento de la seguridad vial, entre 2011 y 2014 no ha habido avances que permitan vislumbrar la posibilidad de acercarse a la meta establecida.

En este trabajo se hace una revisión de los elementos que constituyen el Enfoque de Sistema Vial Seguro, que es el enfoque de vanguardia propuesto para una gestión efectiva de la seguridad vial y de sus aplicaciones exitosas en diferentes países, regiones y ciudades del mundo. A la luz de esta revisión, se identifican los elementos que sería necesario implantar en nuestro país.

Palabras Clave: Seguridad Vial, gestión, enfoque de sistema vial Seguro.

1. ANTECEDENTES

La importancia que la accidentalidad vial (y sus secuelas derivadas de muertos, heridos, discapacitados y daños materiales) ha venido cobrando gran importancia en el mundo y dado que se ha convertido en una de las principales causas de muerte en personas menores de 35 años, la Asamblea General de las Naciones Unidas lanzó en el año 2010 el Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020 (UNGAR, 2010) y en el año 2011 el Plan Global

para el Decenio de Acción (UNRSC, 2011). En ese mismo año México se adhirió al Decenio de Acción (DOF, 2011). El Plan Global tiene la meta de estabilizar y luego reducir en 50% las muertes proyectadas al año 2020 y está organizado alrededor de cinco pilares: (I) Gestión de la seguridad vial, (II) Movilidad y vías más seguras, (III) Vehículos más seguros, (IV) Usuarios de las vías más seguros, y (V) Respuesta después de la colisión. Por lo retardadora de la meta planteada, el Plan Global adopta un enfoque innovador denominado Enfoque de Sistema Vial Seguro (OCDE, 2008) y recomienda implementarlo en todos los países, independientemente de su nivel socioeconómico y del nivel de desarrollo de su infraestructura.

El Enfoque de Sistema Vial Seguro (ESVS) se basa en la posición ética de que no es aceptable que las personas resulten muertas o gravemente heridas al desplazarse por la red vial. Se apoya en el objetivo de largo plazo de eliminar los accidentes que generan muertes y lesiones severas, proporciona además un marco para pasos intermedios y un conjunto de principios de diseño y operación para orientar la acción. El ESVS empezó a ser desarrollado a fines de los años 90's en dos países: Suecia (Visión Cero) y Holanda (Seguridad Sostenible). En este enfoque, en vez de que la prioridad sea la movilidad y el nivel de seguridad vial sólo una consecuencia de cómo dicha movilidad se permite y se realiza, la prioridad es la seguridad vial y se imponen las condiciones necesarias a la movilidad para garantizar los requerimientos y objetivos de la seguridad vial. Así, se coloca a la seguridad vial en el centro de la planeación, diseño y operación del sistema de tránsito. La gestión de la seguridad vial es asumida como un proceso sistémico, que suministra funciones clave de gestión institucional, que producen y posibilitan intervenciones efectivas en todo el sistema diseñadas para generar resultados. En otras palabras, la seguridad vial no sólo ocurre sino que tiene que ser producida.

Los conceptos anteriores de carácter holístico, representan la suma del conocimiento efectivo multidisciplinario en seguridad vial y la práctica exitosa en todo el sistema de tránsito, contruidos a partir de los años 50's cuando el pensamiento y la práctica se basaban en culpar al conductor y a las víctimas y se realizaban intervenciones dispersas, descoordinadas y carentes de recursos suficientes, que cumplían funciones individuales aisladas. Los principios científicos de seguridad que sustentan el ESVS incluyen el reconocimiento de que:

- Los seres humanos pueden cometer errores que pueden conducir a accidentes viales. Este principio es el reconocimiento de que las personas somos falibles y cometemos equivocaciones que pueden generar accidentes.
- El cuerpo humano es frágil por naturaleza y tiene una capacidad limitada para resistir las fuerzas derivadas de las colisiones.
- A diferencia de enfoques anteriores que culpaban exclusivamente a la víctima, el ESVS considera que tanto los usuarios de las vías como los proveedores de los distintos componentes del sistema (por ejemplo: diseñadores de las vías; gerentes viales; responsables de las regulaciones, su seguimiento y atención; la policía; los organismos de

justicia; los fabricantes de vehículos; las empresas de transporte; los servicios de salud; etc.) comparten la responsabilidad de adoptar medidas para que los accidentes viales no conduzcan a lesiones mortales o graves. Por lo tanto se reconoce que la víctima puede tener parte de la culpa, pero ello no exime de su responsabilidad a los distintos proveedores del sistema.

- Todas las partes del sistema deben reforzarse – caminos, zonas laterales, velocidades, vehículos y uso vial – de tal manera que si una falla, otras partes aún seguirán protegiendo a todas las personas involucradas.

En otras palabras, en el ESVS los componentes del sistema deben diseñarse para evitar el error humano así como para perdonarlo de manera que en caso de ocurrir éste, ello no conlleve la generación de muertes o lesiones graves. En esto reside la importancia de la disciplina de los “Factores Humanos” en este enfoque. Adicionalmente, el ESVS demanda la realización de acciones sistémicas, que sean contundentes y efectivas.

Los países de ingresos altos (PIA’s) han adoptado el objetivo de largo plazo del ESVS (la eliminación de las muertes y lesiones graves) y cuentan además, con procesos y estructuras construidos a lo largo de muchos años, que les permiten generar sus metas, planes y programas intermedios a partir del funcionamiento de sus unidades técnicas y gestionarlos subsiguientemente ante los niveles directivos y administrativos superiores, en un enfoque que suele denominarse como “de abajo hacia arriba”. En los países de ingresos medios y bajos (PIMB’s) tales procesos y estructuras generalmente no existen por lo que, ante la carencia de metas, planes y programas, cobra mayor importancia la adopción del objetivo de largo plazo del ESVS.

Poner en operación el ESVS requiere reconocer las siguientes velocidades máximas tolerables de impacto:

- Para los peatones (y ciclistas) no deben permitirse velocidades de impacto mayores a 30 km/h.
- En impactos laterales entre vehículos de pasajeros no deben permitirse velocidades de impacto mayores a 50 km/h.
- En impactos frontales contra objetos rígidos angostos, tales como árboles y postes de electricidad, no deben permitirse velocidades de impacto mayores a 50 km/h, mientras que para impactos laterales contra estos objetos la velocidad de impacto no debe exceder de 30 km/h.
- En colisiones frontales entre vehículos de pasajeros, ningún vehículo debe exceder una velocidad de impacto de 70 km/h.
- En el control de velocidades deben tomarse en cuenta los límites máximos, particularmente el límite general, que en México es 110 km/h y no debe ser excedido operativamente en ningún sitio.

Si se tienen accidentes a velocidades mayores a las antes señaladas, las posibilidades de sobrevivir se reducen exponencialmente. Como es evidente, las velocidades anteriores son relativamente bajas y procurarlas en general representará una restricción a los deseos de movilidad de las personas. Todas las tecnologías que hagan posible reducir o controlar la velocidad de operación, para que al momento de las colisiones el impacto no se produzca a velocidades mayores a las anteriores, harán posible tener límites máximos superiores a tales velocidades. En este sentido, dichas tecnologías pueden verse como inversiones para mejorar no sólo la seguridad sino también la movilidad, en otras palabras, mediante un enfoque de manejo adecuado de la energía cinética se pueden generar acciones sistémicas de mejora que favorezcan los objetivos tanto de seguridad como de movilidad y eficiencia.

Dado que los usuarios pueden cometer errores que conduzcan a accidentes viales y dado que los seres humanos somos frágiles, el ESVS propone que el suministro de todos los componentes del sistema vial sea realizado bajo la óptica de evitar el error humano y de buscar que el sistema sea indulgente para que, en caso de que el error se produzca, el accidente asociado no resulte en muertes y lesiones severas. Por lo tanto, en la siguiente sección se describen algunas acciones o tecnologías de vanguardia importantes, que dentro de diferentes categorías, se han venido implementando en distintas partes del mundo para evitar y perdonar el error humano, en concordancia con el ESVS.

2. EVITAR Y PERDONAR EL ERROR HUMANO

2.1 A través de acciones de mejora con enfoque sistémico

Los accidentes viales son multicausales es decir, obedecen a una cadena de fallas en varios de los componentes del sistema vial (el factor humano, el camino, el vehículo, etc.). La investigación de accidentes viales debe identificar esa cadena. Por lo tanto, las acciones de mejora deben seguir un enfoque sistémico, que aplique medidas de los diferentes campos (mejoramiento de las vías, vehículos, velocidades de viaje, cumplimiento de las regulaciones, etc.), incluyendo campañas de mercadotecnia social dirigidas a los diferentes tipos de usuarios y actores involucrados con el fin de informarles y convencerlos respecto a los beneficios de las medidas, particularmente si éstas conllevan niveles de restricción. Considerando lo anterior, en Suecia se han tomado las siguientes medidas para lograr un nivel óptimo de seguridad en los cruces peatonales a nivel:

- Los vehículos de motor tienen que ceder el paso a los peatones.
- No deben construirse cruces peatonales sobre carreteras con cuatro o más carriles de circulación.
- El límite de velocidad en cruces peatonales debe ser de 30 km/h.
- Instalar dispositivos en el cruce que favorezcan el cumplimiento del límite máximo de velocidad, por ejemplo, instalando plataformas peatonales elevadas.
- Realización de campañas de mercadotecnia social requeridas.

De manera aislada, el efecto de cada medida puede tener algún beneficio, pero cuando trabajan juntas generan interacciones que potencian el beneficio en seguridad vial.

2.2 A través del diseño y operación vehicular

2.2.1 Sistemas de seguridad activa

Son aquéllos destinados a evitar o prevenir el accidente. Algunos de los más importantes son:

a) Asistencia inteligente de velocidad (ISA por “Intelligent Speed Assistance”). Dentro de las tecnologías que se están poniendo a disposición de los conductores para ayudarlos a cumplir con los límites de velocidad, se encuentran los sistemas de asistencia inteligente de velocidad (ISA). Éstos obtienen información de la velocidad del vehículo y el límite de velocidad local, e implementan una acción cuando detectan que el vehículo va excediendo el límite. Existen dos tipos de sistemas de ISA: los pasivos, que simplemente advierten al conductor que su vehículo viaja por encima del límite (por ejemplo, a través de advertencias auditivas, visuales y señales táctiles, como una vibración del pedal del acelerador); y los activos, que intervienen y corrigen automáticamente la velocidad para que el vehículo cumpla con el límite.

b) Frenado automático de emergencia (AEB por “Automatic Emergency Braking”). Una de las tecnologías vehiculares diseñadas para evitar accidentes y disminuir el riesgo de lesión grave mediante la reducción de la velocidad antes del impacto (de seguridad activa) es el frenado automático de emergencia (AEB). El AEB puede alertar al conductor de manera audible o visual sobre un accidente inminente y ayudarlo a utilizar la capacidad máxima de frenado, así como aplicar los frenos de manera independiente al conductor si la situación se vuelve crítica. Algunos sistemas también preparan al vehículo para la colisión, tensando previamente los cinturones de seguridad.

c) Control electrónico de estabilidad (ESC por “Electronic Stability Control”). Es una tecnología vehicular diseñada para reducir los accidentes por pérdida de control del vehículo. El ESC es una tecnología computarizada que mejora la estabilidad mediante la detección y reducción de la pérdida de tracción (derrape). Cuando el ESC detecta una pérdida de control de la dirección, aplica automáticamente los frenos para ayudar al conductor a "dirigir" el vehículo hacia donde tiene la intención de llevarlo. El frenado se aplica automáticamente a las ruedas de forma individual, de tal manera que la rueda delantera exterior contrarresta el sobreviraje (el vehículo gira más en la dirección hacia donde apuntan los neumáticos) o la rueda trasera interior contrarresta el subviraje (el vehículo gira menos en la dirección hacia donde apuntan los neumáticos). Se considera que mediante el uso de esta tecnología podrían evitarse un tercio de los accidentes mortales.

d) Tecnologías para mantenerse en el carril (LKT por “Lane Keeping Technologies”). Dos tecnologías vehiculares diseñadas para mejorar la seguridad vial al ayudar a los conductores a mantenerse en su carril de circulación son la tecnología de Advertencia de Salida de Carril (“Lane Departure Warning” o LDW), conjuntamente con el Sistema de

Ayuda para Mantenerse en el Carril (“Lane Keeping System” o LKS). La tecnología de LDW advierte al conductor que comienza a desviarse del carril mediante la vibración del volante y mostrando una advertencia visual en la pantalla de información del conductor (la vibración tiene tres niveles de sensibilidad). El LKS va un paso adelante en materia de seguridad vial, dado que si el vehículo se desvía de su curso y si el conductor es lento para reaccionar o no responde, le ayuda a guiarlo de vuelta con seguridad al carril correcto al aplicar torsión al volante del vehículo.

e) Sistema de prevención de colisiones (CAS por “Collision Avoidance System”). Los organismos de investigación de accidentes de los países más desarrollados están recomendando instalar los denominados sistemas de prevención de colisiones, particularmente en los vehículos pesados (vehículos de carga que transportan mercancías con peso superior a 4 toneladas y autobuses). El CAS utiliza el radar (en todo tipo de clima) y a veces láser y cámara (que pierden efectividad con mal clima) para detectar una colisión inminente. Una vez que la detección se lleva a cabo, estos sistemas proporcionan una advertencia al conductor o toman medidas de forma autónoma sin ninguna intervención del conductor (por frenado, por cambio de dirección o ambos). Evitar la colisión por frenado es apropiado a velocidades bajas del vehículo (por ejemplo, por debajo de 50 km/h), mientras que evitarla por cambio de dirección es apropiado a velocidades más altas. El CAS tiene el potencial de reducir significativamente los accidentes mortales por alcance en los que se ven involucrados vehículos pesados, los cuales representan alrededor de 40% de tales accidentes.

f) Sistema de control de tracción (TCS por “Traction Control System”). El TCS es un sistema que actúa electrónicamente sobre la potencia del motor o sobre los frenos, para evitar el deslizamiento de las ruedas motrices cuando el conductor se excede en la aceleración del vehículo o la superficie de rodamiento está muy deslizante (por ejemplo, con hielo). Mediante el uso de los mismos sensores y mecanismos que emplea el sistema antibloqueo de frenos (ABS), si en la aceleración una de las ruedas del eje motor del automóvil patina es decir, gira a mayor velocidad de la que debería, el sistema reduce el par de giro y recupera la adherencia entre neumático y pavimento.

g) Etilómetro de interrupción de encendido para vehículos (“Alcolock”). El “alcolock” es un mecanismo que impide que el vehículo arranque si el conductor supera los límites legales de consumo de alcohol. Consta de dos subsistemas:

- Un módulo de control, que es un dispositivo electrónico conectado a los sistemas de encendido del vehículo. Dispone de una memoria para registrar los resultados de los tests, los intentos de arrancar sin superar el test, fecha, horas y niveles de alcohol.
- Un etilómetro sobre el que se realiza el test de alcoholemia. El etilómetro analiza la muestra de aire espirado del conductor. Si su nivel de alcoholemia supera un determinado umbral, no permite el encendido del motor.

2.2.2 Sistemas de seguridad pasiva

Son aquéllos destinados a minimizar las consecuencias del accidente sobre las personas, considerando que éste ya es inevitable. Algunos de los más importantes son:

a) Sistemas de retención. Al producirse un accidente, un ocupante sin cinturón de seguridad continuará su trayectoria, se moverá a la misma velocidad que el vehículo y se impactará con los elementos frente a él, o será expulsado del mismo. En caso de expulsión de algún pasajero del vehículo, la probabilidad de resultar gravemente herido se incrementa así como la de perder la vida. El principal objetivo de los dispositivos de retención es el de disminuir la gravedad del accidente, ya que al utilizarlo de manera adecuada se ha demostrado que los índices de mortalidad disminuyen, aún más en combinación con las bolsas de aire. Existen desarrollos técnicos en el diseño de los sistemas de retención que incluyen pretensores y sistemas de control de energía. Los pretensores actúan al momento de la colisión, de manera que retraen el exceso de velocidad que pueda encontrarse de manera que ajustan el cinturón provocando que el ocupante tenga la mayor aproximación al asiento durante el impacto, lo que mejora la curva de desaceleración del pasajero. Además de esto, los pretensores ayudan a corregir la posición del pasajero de manera que además se previenen lesiones por un mal acomodo de éste al desplegarse la bolsa de aire. En el caso de las mujeres embarazadas, se vende un accesorio para asegurar que el cinturón quede debajo del abdomen, como se muestra en la Figura 1.

b) Bolsas de aire (“Airbags”). Este sistema de seguridad pasiva, ha causado la reducción en un 31% de las heridas fatales en conductores y copilotos que tuvieron percances en los que sólo contaron con la ayuda del “airbag” para detener su trayectoria hacia los elementos frontales del vehículo. Sin embargo, la utilización del “airbag” sin sistemas de retención como el cinturón de seguridad, reduce drásticamente la protección brindada e incluso puede llegar a ser un precursor de heridas importantes a los conductores del automóvil, ya que el inflado del “airbag” ocurre en aproximadamente 30 milisegundos. De igual manera pueden existir heridas en niños que viajen en sistemas de retención infantil en la parte delantera del vehículo, ya que la violenta expulsión del “airbag” dentro del vehículo puede ocasionar lesiones en la espalda del infante.

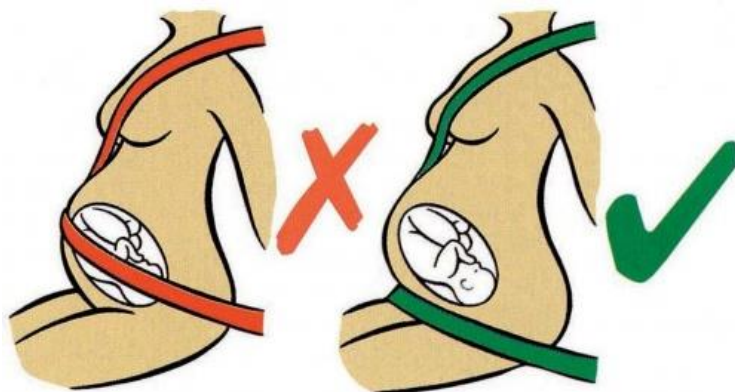


Figura 1. Posición correcta del cinturón de seguridad para mujeres embarazadas

c) Evaluación de vehículos nuevos (NCAP por “New Car Assessment Program”). Un objetivo fundamental del ESVS es lograr que los vehículos sean seguros. En los países más avanzados, la seguridad vehicular al menos de los automóviles, se ha logrado actuando sobre las fuerzas del mercado a través del Programa de Evaluación de Automóviles Nuevos (NCAP por sus siglas en inglés) en vez de mediante esquemas regulatorios. NCAP es un programa en el que participan organismos gubernamentales, fabricantes y organizaciones relacionadas con el sector automotriz. NCAP, que está organizado por regiones del mundo (EuroNCAP para Europa, LatinNCAP para América Latina, etc.), realiza pruebas de seguridad pasiva en automóviles nuevos, entregando una calificación por estrellas basada en el comportamiento del automóvil en pruebas de impacto frontal y lateral, así como en la protección de niños a bordo y de peatones en caso de atropello. Dicha calificación va de 0 a 5, donde 0 corresponde al peor comportamiento y 5 al comportamiento óptimo. Proporcionar esta información al público permite orientar la demanda hacia los vehículos más seguros.

2.3 A través de la gestión de la velocidad

Se describen enseguida algunas de las tecnologías de vanguardia más importantes, para gestionar la operación vehicular a velocidades seguras.

2.3.1 Cámaras de velocidad

Una tecnología dirigida a hacer que los conductores cumplan con los límites de velocidad son las cámaras de velocidad. Éstas se utilizan para registrar infracciones por exceso de velocidad e identificar a los propietarios de los vehículos en función del número de placa. Se basan en radares o en lazos de inducción mediante los cuales se miden las velocidades. Pueden ser fijas, móviles, de luz roja y de punto a punto. Las cámaras fijas se montan en postes o en pórticos encima de la carretera, se utilizan en lugares de alto riesgo tales como túneles o en zonas con antecedentes de accidentes graves. Las cámaras móviles van en vehículos en movimiento, como son las patrullas de la policía, proporcionan verificaciones en cualquier momento y en cualquier lugar y se utilizan para controlar las velocidades en lugares específicos así como en toda la red. Las cámaras de luz roja se instalan en las intersecciones semaforizadas de alto riesgo, para capturar la imagen de los vehículos que cruzan la intersección aunque tengan la luz roja en el semáforo o de aquellos que exceden el límite de velocidad para el cruce. Finalmente, las cámaras de punto a punto miden la velocidad media de los vehículos a través de largas distancias, y se utilizan sólo para controlar la velocidad de los vehículos pesados.

2.3.2 Señales de mensaje variable

Las señales de mensaje variable miden mediante un radar la velocidad del vehículo que se aproxima a ellas y la muestran al conductor, se utilizan para reducir la velocidad del tránsito en vez de los dispositivos físicos como son los “topes”. Estas señales se construyen a base de “diodos emisores de luz” (LED’s), se utilizan a menudo en zonas escolares, zonas de construcción o en vías de elevado flujo vehicular. Se han realizado estudios que han indicado que las reducciones de velocidad obtenidas mediante estos dispositivos son generalmente

inferiores a las obtenidas con los dispositivos físicos. La adición de medidas de vigilancia policiaca y aplicación de infracciones después de la señal (aguas abajo), aumenta su eficacia.

2.3.3 ISA

Se refiere a las tecnologías ya mencionadas bajo el título Asistencia Inteligente de Velocidad (“Intelligent Speed Assistance”). Una tecnología adicional de este tipo que permite mejorar la seguridad y la comodidad vehicular derivada de la aviación militar, es la proyección de los parámetros más importantes del recorrido, directamente sobre el parabrisas o en una pantalla transparente sobre la línea de visión del conductor. De esta manera, éste puede ver la información con la cabeza erguida y mirando hacia el frente, en vez de tener que bajarla para mirar instrumentos ubicados inferiormente.

2.4 A través del diseño y operación de la infraestructura

En este campo las medidas de vanguardia adoptadas son también muy diversas. En primer lugar se hace énfasis en el diseño de las vías, que éste sea fácil de entender para los conductores y que sus alineamientos vertical y horizontal y demás elementos (intersecciones, accesos, incorporaciones, desincorporaciones, gazas, etc.) sean legibles, incluyendo las indicaciones que se dan a los usuarios a través de los señalamientos es decir, que las vías sean auto-explicativas y no generen confusiones. Asimismo, el diseño debe empezar por las necesidades de los más vulnerables es decir, los peatones, los ciclistas, los adultos mayores, los niños, etc. Para una velocidad límite dada, la infraestructura debe diseñarse y operarse de manera que el error humano se minimice y en caso que éste se produzca, no genere muertes o lesiones severas para los tipos prioritarios de colisión (de lo contrario, la velocidad límite debe reducirse para ser indulgente con los errores humanos previsibles). En relación con el diseño de la infraestructura, focalizarse hacia los tipos prioritarios de accidentes y otros aspectos fundamentales es esencial para el desarrollo de un sistema vial seguro, por ejemplo:

- En vías con afluencia de peatones y ciclistas, debe minimizarse la posibilidad de que éstos sufran accidentes, ya sea cuando crucen la vía o cuando circulen a lo largo de ella. Por razones ya mencionadas, a velocidades superiores a 30 km/h, los peatones y los ciclistas deben circular separados del tránsito vehicular.
- En vías con afluencia de motociclistas deben implementarse elementos para protegerlos, tales como barreras laterales, dispositivos de absorción de impacto, carriles separados para motociclistas, sistemas de protección para el piloto y el pasajero (ropa).
- En las intersecciones debe minimizarse la posibilidad de colisión aplicando principios del diseño de intersecciones seguras, tales como: (I) limitar la velocidad del tránsito a través de las intersecciones a 50 km/h, (II) evitar ángulos de impacto de 90°, (III) limitar los puntos de conflicto, (IV) separar a los usuarios vulnerables o limitar la velocidad a 30 km/h en la intersección, y (V) promover a través del diseño, la responsabilidad mutua activa en las intersecciones (por ejemplo, distribuir equitativamente el derecho de paso en vez de dárselo de manera exclusiva a un sólo grupo de usuarios).

- En el caso de accidentes por salida del camino, las medidas pueden ser de los tipos siguientes: (I) mantener los vehículos en la carretera a través del diseño geométrico adecuado (alineamiento y pendiente transversal); (II) aplicar medidas contra la fatiga, la inatención y las distracciones; y (III) suministrar zonas laterales para acomodar la común ocurrencia de salidas del camino.
- En el caso de accidentes frontales, la probabilidad de lesión severa aumenta a velocidades por encima de 70 km/h. Suecia es un país que ha sido muy exitoso en la reducción de los accidentes frontales en carreteras no divididas, con calzada de 13 m y un solo carril por sentido con acotamientos anchos, mediante la instalación de sistemas de barrera flexible a base de cables en tramos en los que se instalan alternadamente dos carriles en un sentido y uno en el otro, reduciendo en estos tramos los acotamientos a 1 m (sistema 2 + 1); y más recientemente en su calzadas de 9 m con un sistema 1 + 1. La Figura 2 ilustra el sistema 2 + 1.
- Como ya se mencionó la propuesta de medidas de mejoramiento debe seguir un enfoque sistémico, incluyendo campañas de mercadotecnia social.
- En los cruces peatonales, las medidas pueden ser de los tipos siguientes: instalaciones de tiempo separado (semáforos peatonales en intersecciones y a media cuadra), plataformas elevadas, pasos a desnivel o puentes peatonales amigables para los peatones.
- Las glorietas se utilizan para mitigar las consecuencias de los errores humanos comunes, por ejemplo, pasarse la luz roja en intersecciones con semáforos ya sea intencional o no intencionalmente. Las glorietas guían al usuario de la vía a adoptar velocidades más bajas y configuraciones de choque más favorables (ángulos de colisión más pequeños).
- Un aspecto fundamental es lograr que ya no se construyan vías inseguras. El primer requisito para ello es contar con normas de diseño actualizadas que consideren las necesidades y hallazgos de vanguardia en relación con la seguridad vial y el factor humano. Un segundo requisito por lo tanto, es someter el diseño a una auditoría de seguridad vial, la cual es un proceso formal de revisión del mismo por parte de un experto o equipo de expertos calificados e independientes (que no participaron en el diseño) que analizan su nivel de seguridad, poniendo de manifiesto todos y cada uno de los riesgos potenciales. Las auditorías de seguridad vial pueden también realizarse en etapas posteriores al diseño (una vez construida la vía pero antes de abrirla al tránsito, o cuando ya se encuentra en operación) en el entendido de que las soluciones correctivas propuestas resultarán más onerosas a medida que correspondan a etapas más tardías (es más fácil y barato corregir los planos de diseño que corregir la vía una vez construida). Tanto el diseño como las auditorías deben considerar las necesidades de todos los tipos de usuarios. Cada vez es más común, auditar nuevos diseños o vías existentes con base en su calificación por estrellas. Este enfoque fue desarrollado por el Programa Internacional de Evaluación de Carreteras (iRAP por sus siglas en inglés), que es una organización internacional sin fines de lucro. Consiste en obtener información digital sobre los atributos de la infraestructura (tipo de calzada, número y ancho de carriles, curvatura, pendiente, visibilidad, señalamiento, ancho de acotamientos, ancho y nivel de protección de la faja separadora central y de las zonas laterales, densidad de accesos, instalaciones

para peatones, ciclistas y motociclistas, etc.), y combinarla con su velocidad de operación, sus índices de accidentalidad, sus flujos de tránsito, etc., para estimar el nivel de riesgo de las vías con base en su calificación por estrellas y generar recomendaciones de intervención para reducir el nivel de riesgo, así como su costo y aumentar la relación beneficio/costo. El sistema otorga para cada tipo de usuario (ocupante de vehículo, motociclista, ciclista o peatón) una calificación de 1 a 5 estrellas donde 1 corresponde a vías que no cuentan con los elementos de seguridad apropiados para las velocidades de operación actuales y 5 corresponde a vías que cuentan con todos los elementos de seguridad. A nivel internacional se acepta una calificación mínima de tres estrellas para los diferentes tipos de usuarios de vías importantes (arterias).

2.5 A través del fortalecimiento de la capacidad

Dado que la aplicación del ESVS representa un “cambio de cultura”, su implementación eficaz requiere del fortalecimiento de la capacidad de gestión institucional. Esto puede lograrse a través de proyectos del tipo siguiente:

- Crear una agencia líder para atender el problema de la accidentalidad vial y fortalecer su papel, así como su función de coordinación interinstitucional.
- Preparar una estrategia nacional de seguridad vial y el plan de acción correspondiente.
- Asignar recursos financieros y humanos para hacer frente al problema.
- Implementar acciones específicas para prevenir los accidentes de tránsito, reducir al mínimo los traumatismos y sus consecuencias y evaluar el impacto de estas acciones.
- Apoyar el desarrollo de la capacidad nacional y la cooperación internacional.
- Generar una base de datos integral de accidentes viales.
- Tratar corredores y áreas de alto riesgo mediante intervenciones adecuadas, por ejemplo, acciones sistémicas que involucren mejoras de seguridad de la infraestructura; programas de cumplimiento de las normas de seguridad vial, apoyados por campañas intensivas de publicidad y sensibilización (por ejemplo, velocidad, alcohol, cinturones de seguridad y cascos, fatiga, vehículos del servicio público); mejoramiento de la respuesta después de los accidentes y de los servicios médicos de emergencia y rehabilitación; etc.
- Instrumentar reformas de política, por ejemplo: licencias de conducir, estándares de seguridad de los vehículos, etc.
- Establecer un sistema de monitoreo y evaluación.



Figura 2. Sistema Carretero 2+1

- Es también indispensable que el ESVS sea entendido y aceptado desde el más alto nivel, desde los políticos hasta el personal en la primera línea. Este personal debe incluir a los ingenieros de tránsito, los ingenieros de infraestructura, la policía, los urbanistas, los financieros, los ingenieros de vehículos, los educadores y muchos otros en toda la gama de las agencias cuyo trabajo afecta directamente el desempeño en seguridad vial. En particular, las agencias de transporte responsables del diseño del sistema de carreteras, la construcción, mantenimiento y las operaciones de tránsito deben asegurarse que sus empleados entiendan, acepten y apliquen los principios del ESVS. Esto requerirá la impartición de cursos en la materia dentro del programa regular de capacitación así como el desarrollo de competencias específicas como parte de los requisitos del servicio profesional de carrera.

3. EXPERIENCIAS DE IMPLANTACIÓN EN DIFERENTES JURISDICCIONES

3.1 La experiencia de Suecia

La “Visión Cero” de Suecia parte de la premisa de que “Ninguna pérdida de vida a causa del tránsito es aceptable”. Este sistema se basa en el hecho de que somos humanos y cometemos errores; consiste en proporcionar seguridad a pesar de que dichos errores ocurran. Estipula que el sistema vial debe proporcionar seguridad a todos los usuarios (Sweden Sverige et al., 2016).

Suecia reporta una de las tasas de mortalidad debida al tránsito más bajas del mundo, mostrando estadísticamente que la seguridad no compromete la movilidad, por el contrario, el incremento de la movilidad está directamente relacionado con la efectividad de las medidas de seguridad vial. Las tasas de mortalidad y del volumen de tráfico están relacionadas en parte, con los cambios en el crecimiento económico. Pero en Suecia, en el periodo de 1950 a 2010, se reporta que las muertes en carretera han disminuido a pesar del aumento constante en el volumen de tránsito (véase Figura 3).

Para 2014 Suecia reportó 270 muertes por accidente de tránsito, cantidad que representa una de las menores tasas de mortalidad a nivel mundial, reportando únicamente tres muertos por cada 100,000 habitantes, 4 muertes por cada mil millones de vehículos-kilómetros recorridos y menos de 0.5 muertes por cada 10,000 vehículos registrados (IRTAD, 2016).

A pesar de los buenos resultados obtenidos con la implementación de la Visión Cero, en Suecia se considera que aún hay muchas cosas que se pueden hacer para mejorar la seguridad vial. Plantean reducir en otro 90% las muertes con el establecimiento de medidas que eliminen las fallas del sistema técnico, incrementen el uso del cinturón de seguridad y disminuyan el conducir a gran velocidad y bajo los efectos del alcohol (Sweden Sverige et al., 2016).

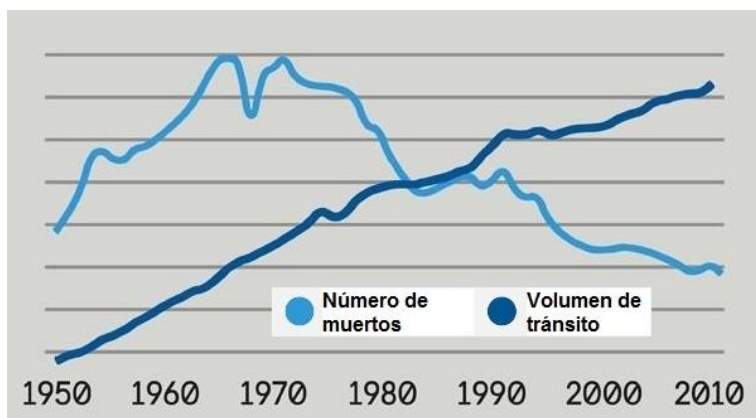


Figura 3. Crecimiento del volumen de tránsito y de muertos debido a los accidentes de tránsito para el periodo 1950-2010

Fuente: Sweden Sverige et al., 2016

3.2 La experiencia de Australia del Sur

En la región sur de Australia durante los últimos 30 años se ha registrado una reducción sustancial en el número de muertos y lesionados graves debidos a los accidentes de tránsito. A partir del año 2006 se aplicó en Australia el enfoque de “Un sistema seguro”, mismo que considera que el error humano es inevitable. Dicho sistema está basado en la tolerancia del cuerpo humano a la cantidad de fuerza física que se pueda ejercer sobre él. El Sistema Seguro Australiano se centra en cuatro áreas de acción prioritarias para la seguridad vial: rutas más seguras, velocidades más seguras, usuarios más seguros y vehículos más seguros.

A pesar de las mejoras obtenidas, consideran que aún hay mucho por hacer ya que más de 100 australianos de la región fallecen y más de 1,000 resultan heridos cada año a causa de los accidentes de tránsito, lo que representa una gran cantidad de dolor, sufrimiento y pérdida, así como un gran costo económico de cerca de mil millones de dólares anuales.

En la Figura 4 se muestra la evolución de los muertos y lesionados graves a causa de los accidentes de tránsito en Australia del Sur entre 1981-2010; para el periodo 1981-1983 en promedio perdían la vida 252 personas a causa de los accidentes de tránsito, cifra que se redujo a 155 para el periodo 2001-2003 y a 112 para 2008-2010. Los lesionados graves han tenido un comportamiento similar, de 3,104 en 1981-1983 se redujeron a un promedio de 1,126 entre los años 2008-2010 (Government of South Australia, 2011).

Las metas de Australia del Sur para el 2020 contemplan reducir en al menos 30% los muertos y lesionados graves a consecuencia de los accidentes de tránsito, hasta reportar menos de 80 muertos y 800 lesionados por año (4.5 muertos y 45 lesionados graves por cada 100,000 habitantes) (Government of South Australia, 2011).

Experiencias nacionales similares se han venido desarrollando en Holanda, Dinamarca y Nueva Zelanda, entre otros países.

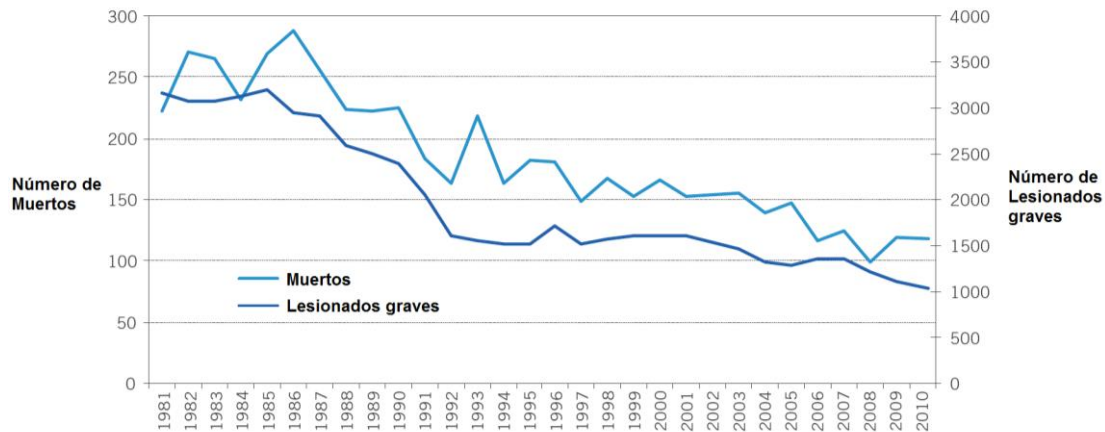


Figura 4. Muertos y Lesionados graves por accidentes de tránsito en Australia del Sur, 1981-2010

3.3 La experiencia de Edmonton, Canadá

La ciudad de Edmonton, en Canadá, tenía una mayor frecuencia de lesionados por accidentes viales que otras ciudades canadienses importantes. Para contrarrestar dicha situación establecieron la Oficina de Tránsito Vial (OTV), agencia encargada de crear los protocolos de integración y colaboración con el Departamento de Servicios de Transporte, el Servicio Policial de Edmonton y las comunidades dentro de la Ciudad de Edmonton y que utiliza una variedad de estrategias basadas en el concepto de las 5 E's ("Education", "Engineering", "Enforcement", "Engagement" y "Emergency Care"). A pesar de un incremento del 40% en el tránsito vehicular entre 2006 y 2014 han reducido el número de lesiones en 55%. Considerando que el error humano genera alrededor del 90% de las colisiones, con el fin de lograr la "Visión Cero", la ciudad de Edmonton requirió adoptar el ESVS el cual está dirigido a lograr un sistema vial indulgente.

Otras ciudades en el mundo con experiencias similares de "Visión Cero" son San Francisco, Nueva York, Boston, Portland, Chicago, Seattle, San José, San Diego, todas ellas en los Estados Unidos.

3.4 La experiencia en Latino-América

En Latino-América hay algunos países que están haciendo sus primeros esfuerzos para la implementación del Enfoque de Sistema Vial Seguro basado en la Visión Cero de Suecia, ya sea a nivel nacional como Argentina, o por regiones como en Colombia y México.

Argentina

Entre los países que buscan la implementación del ESVS destaca Argentina, donde la Asociación Argentina de Carreteras convoca a toda la sociedad a unirse al objetivo de contar con un sistema vial seguro con cero muertos o heridos graves. Ellos plantean cuatro principios fundamentales para llegar al objetivo de la visión cero: 1) La vida y la salud humana tienen prioridad sobre la movilidad y cualquier otro objetivo del sistema de tránsito vial, 2) El ser humano es falible, 3) El sistema de tránsito vial debe tener en cuenta la

falibilidad del ser humano y, 4) El ser humano tiene derecho a un sistema de transporte seguro (AAC, 2015).

Bogotá, Colombia

En la ciudad de Bogotá desde 2006 se han formulado estrategias, planes y programas con el propósito de reducir la accidentalidad y sus consecuencias, promoviendo la adopción de comportamientos de autorregulación, solidaridad y corresponsabilidad que favorezcan la movilidad segura. Todos estos programas han sido encaminados a lograr la implementación de la Visión Cero. Estas acciones han tenido resultados favorables, ya que para el primer semestre de 2013 se registraron 310 fallecidos (en el 1% de los accidentes ocurridos), reduciéndose un 19% respecto al mismo periodo de 2012. Las acciones que se han llevado a cabo para la implementación de la Visión Cero se refieren a tres elementos básicos: 1) Reducción de velocidad en las vías donde transitan peatones, 2) Diseño vial que priorice a los usuarios vulnerables y, 3) Reforzar acciones de pedagogía con las de control. Con el seguimiento de estos principios esperan convertirse para el 2019 en la primer megaciudad con cero fatalidades en accidentes de tránsito (SDM, 2014; APDBMT, 2016).

Ciudad de México, México

El Gobierno de la Ciudad de México incluyó en su nuevo reglamento (que entró en vigencia en diciembre de 2015) acciones relacionadas con la Visión Cero, así mismo, el 11 de marzo de 2016 puso en marcha la Campaña “Yo me fijo, yo respeto”, cuya finalidad es reducir el número de muertes y accidentes viales. La campaña está basada en ocho conductas básicas incluidas en el Reglamento de Tránsito: 1) No conducir bajo los efectos del alcohol o las drogas, 2) No conducir a exceso de velocidad, 3) Uso de cinturón de seguridad para todos los ocupantes, 4) Uso de sillas protectoras para infantes, 5) No conducir utilizando el celular, 6) Uso obligatorio de casco para motociclistas, 7) No hay vueltas continuas y, 8) Respetar los pasos peatonales (RTDF, 2015 & SEMOVI, 2016).

La Secretaría de Seguridad Pública de la Ciudad de México evalúa la efectividad de sus reglamentos a un mes de su entrada en vigencia. En la Tabla 1 se presenta la comparativa de accidentes a un mes de haber entrado en vigor el reglamento actual y se observa una disminución en la cantidad de fallecidos y lesionados, respecto al reglamento anterior (SSP-DF, 2016).

Tabla 1. Comparativa de accidentes a un mes de entrar en vigencia el Reglamento de Tránsito (SSP-DF, 2016)

| Delito | 2014-2015 | 2015-2016 | Diferencia |
|----------------------------------|------------------|------------------|-------------------|
| Homicidio por tránsito vehicular | 58 | 48 | -10 |
| Lesiones por tránsito vehicular | 295 | 276 | -19 |
| Daño por tránsito vehicular | 290 | 257 | -33 |
| Total | 643 | 581 | -62 |

3.5 Programas particulares

Algunos programas particulares de ESVS o “Visión Cero” que están siendo implementados con éxito en diferentes partes del mundo son: las medidas para zonas escolares en Japón (la construcción de sendas peatonales separadas del tránsito vehicular), las políticas de zona 30 (km/h) también en Japón, la coalición para adultos mayores en los Estados Unidos, etc.

4. CONCLUSIONES

En la mitad del Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020, las tendencias globales de reducción de las muertes y lesiones severas por accidentes viales no son suficientes para cumplir con los objetivos del mismo. Lo anterior hace necesario instrumentar enfoques y sistemas de gestión más efectivos para cerrar la brecha de desempeño existente, tales como el ESVS sobre el cual versa este trabajo. Es importante considerar la experiencia de otros países en la implementación de este tipo de Enfoques, ya que vemos que en México se han hecho pequeños avances pero sólo en una ciudad, que si bien es la más grande del país, no necesariamente reporta la mayor cantidad de fallecidos y lesionados a causa de los accidentes de tránsito.

A la luz de la revisión realizada, algunos elementos que sería necesario implantar en nuestro país para una gestión efectiva de la seguridad vial son: 1) Crear una agencia líder responsable de atender el problema de la siniestralidad vial a nivel nacional, aplicando los elementos que constituyen el ESVS (principios, acciones, tecnologías, etc.), 2) Crear una red de actores, tanto del sector público como del sector privado, 3) Instrumentar protocolos de integración y colaboración interinstitucional, 4) Crear una asociación de autoridades locales (por ejemplo, una extensión de la Conferencia Nacional de Gobernadores), 5) Implementar sistemas de gestión a nivel jurisdiccional (por ejemplo, el propuesto por el Banco Mundial, que suministra funciones clave de gestión institucional, que producen y posibilitan intervenciones efectivas en todo el sistema, diseñadas para generar resultados) y corporativo (por ejemplo, norma ISO 39001), 6) Crear un sistema de coordinación interinstitucional para la generación de la base de datos integral de accidentes viales, 7) Desarrollar un sistema de indicadores para dar seguimiento a la evolución de la siniestralidad vial y evaluar la efectividad de las medidas y programas adoptados, 8) Impulsar la creación de ONG's y asociaciones nacionales que promuevan el compromiso gubernamental y de los demás actores involucrados, 9) Crear una agencia nacional de investigación de accidentes, particularmente aquéllos con muertes y lesiones graves, con el fin de identificar la cadena de fallas y generar la propuesta de medidas de mejoramiento en los diferentes campos, en la búsqueda de soluciones integrales y holísticas, 10) Contar permanentemente con una red temática colaborativa de investigación sobre el tema “Accidentes Viales”, dirigida a la investigación, capacitación, realización de congresos y seminarios y transferencia de conocimientos y tecnología, tanto a nivel nacional como internacional.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con fondos de la Red Temática de Investigación “Accidentes Viales” (Número 253411), como parte del programa de Redes Temáticas 2015 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

REFERENCIAS

ALCALDÍA MAYOR DE BOGOTÁ D.C., APDBMT. (2016). *Anteproyecto del Plan de Desarrollo Bogotá Mejor para Todos 2016-2019*.

ASOCIACIÓN ARGENTINA DE CARRETERAS, AAC. (2015). *Declaración hacia Visión Cero, Argentina, 2011*. Disponible en línea: <http://www.aacarreteras.org.ar/vision-cero/Declaracion.pdf>, consultada en mayo 2016.

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, DOF. (2011). *Acuerdo por el que se da a conocer la Estrategia Nacional de Seguridad Vial 2011-2020*. México, DF, 6 de junio de 2011.

GOVERNMENT OF SOUTH AUSTRALIA. (2011). *Towards Zero Together*. South Australia’s Road Safety Strategy 2020.

INTERNATIONAL ROAD TRAFFIC AND ACCIDENT DATABASE, IRTAD. (2016). *Road Safety Annual Report 2016*.

ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICO, OCDE. (2008). *Objetivo Cero: Objetivos Ambiciosos para la Seguridad Vial y el Enfoque de Sistema Seguro*. París, Francia.

REGLAMENTO DE TRÁNSITO DEL DISTRITO FEDERAL, RTDF. (2015). *Gaceta Oficial Distrito Federal, Decima Octava Época, No. 156 Bis*. Publicado el 17 de agosto de 2015.

SECRETARÍA DISTRITAL DE MOVILIDAD, SDM. (2014). *Realidad y retos seguridad vial en Colombia, Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.* Disponible en línea: http://www.movilidadbogota.gov.co/hiwebx_archivos/ideofolio/presentacion-secretaria-foro--contraloria-maria-contanza-modo-de-compatibilidad_13591.pdf, consultada en mayo de 2016.

SECRETARÍA DE MOVILIDAD, SEMOVI. (2016). *Visión Cero Accidentes, Campaña “Yo me fijo, yo respeto”*. Página de la SEMOVI: <http://www.semovi.cdmx.gob.mx/work/sites/stv/docs/visioncero/index.html>, consultada en junio de 2016.

SECRETARÍA DE SEGURIDAD PÚBLICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO, SSP-DF. (2016). *Comparativo de Accidentes*. Disponible en: http://www.ssp.df.gob.mx/reglamentodetransito/comparativo_accidentes.html, consultada en junio de 2016.

UNITED NATIONS GENERAL ASSEMBLY RESOLUTION 64/255, UNGAR. (2010). *Decenio de Acción por la Seguridad Vial 2011-2020*.

UNITED NATIONS ROAD SAFETY COLLABORATION, UNRSC. (2011). *Global Plan*

for the Decade of Action for Road Safety 2011 – 2020. World Health Organization. Geneva. SWEDEN SVERIGE, THE SWEDICH TRADE & INVEST COUNCIL & GOVERNMENT OFFICES OF SWEDEN. (2016). *The Vision Zero Initiative, Traffic Safety by Sweden*. Disponible en línea: <http://www.visionzeroinitiative.com/>, consultada en mayo de 2016.

60 Ocorrências de acidentes em rodovias e sua correlação com outras variáveis relevantes: Estudo de caso em Pernambuco, Brasil

Mauricio Renato Pina Moreira
Anísio Brasileiro de Freitas Dourado
Universidade Federal de Pernambuco, Brasil

RESUMO

A matriz de transportes no Brasil revela um forte desbalanceamento entre os diversos modos. No transporte de cargas, a participação do modo rodoviário é atualmente da ordem de 60%, variando de 59% a 61% conforme a fonte pesquisada. Quanto ao transporte de passageiros, essa participação é de cerca de 96% (CNT, 2014). Esses números mostram-se bem diferentes se comparados com outros países de área territorial aproximadamente equivalente, como a Rússia, o Canadá, os Estados Unidos e a Austrália.

Um aspecto preocupante relacionado ao transporte rodoviário no Brasil diz respeito à elevada ocorrência de acidentes de trânsito.

Nos últimos anos, vem sendo desenvolvida no curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco uma linha de pesquisa sobre a ocorrência de acidentes nas rodovias, gerando diversos Trabalhos de Conclusão de Curso (TCCs). Um recente trabalho, concluído em fevereiro de 2015 e desenvolvido, sob a orientação do professor Mauricio Renato Pina Moreira, pelas concluintes Gabriela Lôbo e Roberta Prota, intitulado “Uma Abordagem Estatística sobre os Acidentes nas Rodovias de Pernambuco” (Lôbo e Bezerra, 2015), objetivou analisar a quantidade de acidentes de trânsito no Estado de Pernambuco, em função de três outras variáveis selecionadas, a saber: os investimentos realizados na manutenção rodoviária, o índice de qualidade do pavimento das rodovias e a frota registrada de veículos. Essas três variáveis foram escolhidas em virtude de terem sido consideradas, a princípio, explicativas da ocorrência de acidentes, e também por ser factível o acesso às suas informações. Apresenta-se neste artigo a análise estatística dos resultados.

Palavras-chave: Acidentes, Investimentos na manutenção, Qualidade do pavimento, Frota

1. INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma extensão total de rodovias de 1,580,874.9 km, dos quais apenas 212,690.5 km são pavimentados (Moreira, 2013). Ainda daquele total, 75,852.4 km, ou seja

apenas 4.8%, correspondem a rodovias federais. As informações mais recentes de domínio público sobre acidentes nas rodovias federais brasileiras referem-se ao ano de 2011, no qual foram registrados 188,925 acidentes de trânsito, com 104,448 feridos e 8,480 mortos. Tais números representam uma média diária de 517.6 acidentes de trânsito, com 286.2 feridos e 23.2 mortos.

A área de estudo considerada para fins da pesquisa foi o Estado de Pernambuco, localizado na região Nordeste do Brasil, cuja área territorial é um pouco superior a 98 mil km² e que possui uma população da ordem de 8.8 milhões de habitantes. A extensão total de rodovias pavimentadas em Pernambuco é de 6,909 km, dos quais 2,503 km são de rodovias federais, 3,899 km de rodovias estaduais e 507 km de rodovias municipais.

Em função de investimentos públicos e privados realizados no Estado de Pernambuco a partir dos anos 2000, como a duplicação de importantes rodovias e a criação de expressivos polos econômicos nos setores automobilístico, naval, farmacológico e de refino de petróleo, foram muito impulsionadas as cadeias produtivas na região. A taxa de crescimento do Produto Interno Bruto (PIB) no Estado de Pernambuco tem sido superior à média nacional. Esse fato se reflete em vários aspectos relacionados ao tema aqui tratado: as necessidades de um maior escoamento da produção e de atendimento às demandas proporcionam maiores volumes de tráfego pesado nas rodovias, o que acarreta deterioração do pavimento e aumento do número de acidentes de trânsito.

2. OBJETIVO, DESCRIÇÃO E METODOLOGIA DA PESQUISA

O objetivo da pesquisa consistiu em determinar um modelo matemático capaz de relacionar a quantidade de acidentes (A) com as seguintes variáveis: I (investimentos realizados na manutenção rodoviária), Q (qualidade do pavimento da rodovia) e F (frota registrada de veículos), por meio de uma análise de regressão linear múltipla definida a princípio pela seguinte equação:

$$A = k + bI + cQ + dF \quad (1)$$

Como ao aumento da variável “I” deveria corresponder uma redução do número de acidentes, a expectativa seria que o coeficiente “b” resultasse negativo. A uma melhoria da qualidade da rodovia corresponde um maior valor de “Q” e, portanto, o coeficiente “c” também deveria ser negativo, já que um pavimento em melhor condição também deveria contribuir para a redução do número de acidentes. Por fim, a um aumento da frota e, por extensão, do volume de tráfego, deveria corresponder um aumento no número de acidentes (desde que o aumento do volume de tráfego não esteja relacionado a significativas reduções de velocidade), conduzindo o raciocínio a que o coeficiente “d” resultasse positivo. Descreve-se a seguir a metodologia utilizada para o levantamento das variáveis selecionadas e os seus respectivos resultados.

2.1 Acidentes ocorridos nas rodovias federais e estaduais de Pernambuco

Sobre as estatísticas de acidentes, foram as mesmas obtidas, para o caso das rodovias federais, por meio da página do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) na Internet até o ano de 2011. Para os anos de 2012 a 2014, as estatísticas não estão disponibilizadas nesse endereço na Internet e foram obtidas diretamente junto à Superintendência da Polícia Rodoviária Federal (PRF) em Pernambuco. Os acidentes nas rodovias federais de Pernambuco passaram de 4,039 no ano de 2005 para 7,379 no ano de 2014 ou seja, um acréscimo de 82.7%, o que representa uma taxa média de crescimento anual de cerca de 6.2%. Quanto às rodovias estaduais, as estatísticas foram fornecidas pelo Batalhão de Polícia Rodoviária (BPRV). Os acidentes nas rodovias estaduais de Pernambuco passaram de 2,538 no ano de 2007 para 3,658 no ano de 2014, ou seja, um acréscimo de 44.1% ou uma taxa média de crescimento anual da ordem de 4.7%. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 1.

A Figura 1 ilustra a ocorrência de acidentes de trânsito nas rodovias federais e estaduais de Pernambuco durante o período analisado. Observa-se que a quantidade de acidentes nas rodovias federais praticamente dobrou de 2005 a 2011 e teve uma ligeira redução nos três anos subsequentes. Já os acidentes nas rodovias estaduais mantiveram-se dentro de um intervalo com menos variações, compreendido entre aproximadamente 2,500 e 3,700 acidentes por ano.

Tabela 1. Quantidade de acidentes de trânsito nas rodovias federais e estaduais de Pernambuco

| Ano | Acidentes de trânsito nas rodovias de Pernambuco | |
|------|--|-----------|
| | Federais | Estaduais |
| 2005 | 4,039 | (*) |
| 2006 | 4,327 | (*) |
| 2007 | 4,816 | 2,538 |
| 2008 | 5,330 | (*) |
| 2009 | 5,993 | 2,398 |
| 2010 | 7,357 | 2,872 |
| 2011 | 8,059 | 2,925 |
| 2012 | 7,217 | 3,461 |
| 2013 | 7,611 | 3,417 |
| 2014 | 7,379 | 3,658 |

Fontes: DNIT

(*) Informação não disponível.

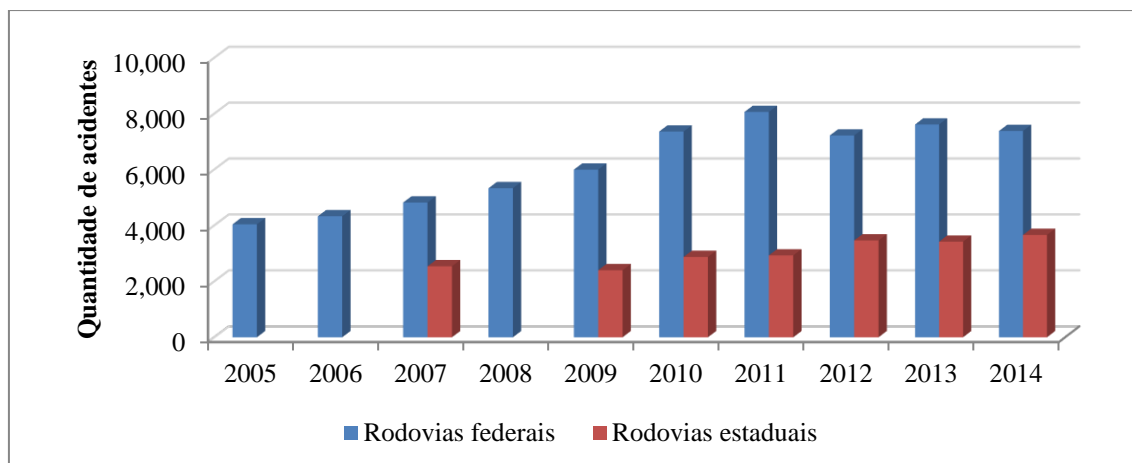


Figura 1. Acidentes de trânsito nas rodovias estaduais e federais de Pernambuco

Fontes: DNIT

Obs.: Não foram obtidas as informações referentes aos acidentes nas rodovias estaduais nos anos de 2005, 2006 e 2008

2.2 Investimentos realizados na manutenção rodoviária

Foram obtidas informações sobre os investimentos realizados na manutenção rodoviária durante o período de 2005 a 2014 junto aos respectivos órgãos rodoviários responsáveis em função de sua jurisdição, a saber, o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) para as rodovias federais e o Departamento de Estradas de Rodagem de Pernambuco (DER/PE) para as rodovias estaduais. Os resultados do levantamento quanto aos investimentos realizados nas rodovias federais e estaduais de Pernambuco, a preços históricos, estão apresentados na Tabela 2. A título de esclarecimento, a unidade monetária brasileira (R\$) corresponde, no mês de janeiro de 2016, a aproximadamente 0.25 US\$ (25 centavos de dólar norte-americano) ou a cerca de 0.23 € (23 centavos de euro).

Considerando a inflação durante o período, os valores históricos dos investimentos foram atualizados para o ano de 2014 por meio da adoção de um indicador econômico considerado apropriado ao caso, qual seja, o Índice Nacional de Custo da Construção (INCC). Os valores atualizados estão apresentados na Tabela 3.

A Figura 2 ilustra os investimentos realizados na manutenção das rodovias estaduais e federais durante o período analisado, com base nos números indicados nas Tabelas 2 e 3. Observa-se que os investimentos realizados na manutenção das rodovias federais em Pernambuco aumentaram 2,198.0% de 2007 a 2013, enquanto nas rodovias estaduais mantiveram-se razoavelmente estáveis durante o mesmo período.

Tabela 2. Investimentos na manutenção de rodovias federais e estaduais de Pernambuco a preços históricos (10⁶ R\$)

| Ano | Investimentos realizados a preços históricos (r\$ 10 ⁶) | | |
|------|---|--------------------|-------|
| | Rodovias federais | Rodovias estaduais | Total |
| 2005 | 15.0 | 11.2 | 26.2 |
| 2006 | 7.2 | 21.6 | 28.8 |
| 2007 | 6.0 | 15.6 | 21.6 |
| 2008 | 52.8 | 20.2 | 73.0 |
| 2009 | 84.8 | 17.1 | 101.9 |
| 2010 | 77.1 | 13.6 | 90.7 |
| 2011 | 131.8 | 28.9 | 160.7 |
| 2012 | 121.7 | 25.8 | 147.5 |
| 2013 | 215.0 | 34.5 | 249.5 |
| 2014 | 220.0 | 31.7 | 251.7 |

Fontes: DNIT

Tabela 3. Investimentos na manutenção de rodovias estaduais e federais em Pernambuco atualizados pelo INCC para o ano de 2014 (10⁶ R\$)

| Ano | Investimentos atualizados pelo INCC (R\$) | | |
|------|---|-------------------|-------|
| | Rodovias estaduais | Rodovias federais | Total |
| 2005 | 21.0 | 28.0 | 49.0 |
| 2006 | 38.7 | 12.8 | 51.5 |
| 2007 | 26.5 | 10.2 | 36.7 |
| 2008 | 31.4 | 82.3 | 113.7 |
| 2009 | 24.8 | 122.6 | 147.4 |
| 2010 | 18.5 | 104.8 | 123.3 |
| 2011 | 36.5 | 166.1 | 202.6 |
| 2012 | 30.4 | 143.3 | 173.7 |
| 2013 | 37.6 | 234.4 | 272.0 |
| 2014 | 32.1 | 222.9 | 255.0 |

Fontes: DNIT

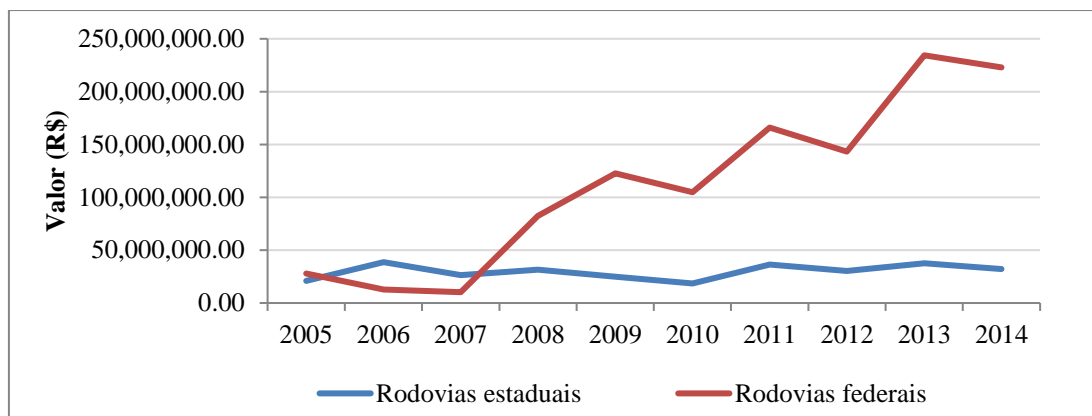


Figura 2. Investimentos na manutenção das rodovias estaduais e federais em Pernambuco, atualizados pelo INCC para 2014

2.3 Índice de qualidade geral das rodovias federais e estaduais de Pernambuco

Para a obtenção do índice de qualidade geral das rodovias, foram analisados os Relatórios Gerenciais Anuais da Pesquisa CNT de Rodovias. Essas pesquisas vêm sendo realizadas desde 1995 pela Confederação Nacional do Transporte (CNT). O resultado geral das pesquisas é determinado por meio da análise das condições do pavimento, da sinalização e da geometria das rodovias. Sobre o pavimento, são verificados os seguintes itens: a condição da superfície, as restrições de velocidade devidas ao pavimento e a existência e a condição do pavimento no acostamento. A respeito da sinalização, são levantados no campo os itens: existência adequada de pintura do pavimento (faixas centrais e laterais), as placas de limite de velocidade, as placas de indicação, as placas de interseção e ainda as condições de visibilidade e legibilidade das placas de sinalização. Os itens analisados sobre a geometria compreendem o tipo e o perfil da rodovia, a existência e a condição da faixa adicional de subida para veículos lentos, as condições das obras de arte correntes e especiais (bueiros, pontilhões, pontes e viadutos), a existência de curvas perigosas e de acostamentos. Foi possível separar os resultados dessas pesquisas, considerando as rodovias federais e estaduais de Pernambuco, conforme é mostrado nas Figuras 3 e 4.

Com vistas à análise estatística, a avaliação qualitativa foi transformada em quantitativa, associando-se os conceitos a índices, da maneira apresentada na Tabela 4.

Para cada ano, considerando os índices indicados na Tabela 4 e os respectivos percentuais correspondentes a cada conceito conforme as Figuras 3 e 4, foi obtida uma média ponderada dos índices, obtendo-se os resultados apresentados nas Tabelas 5 e 6, respectivamente para as rodovias federais e estaduais.

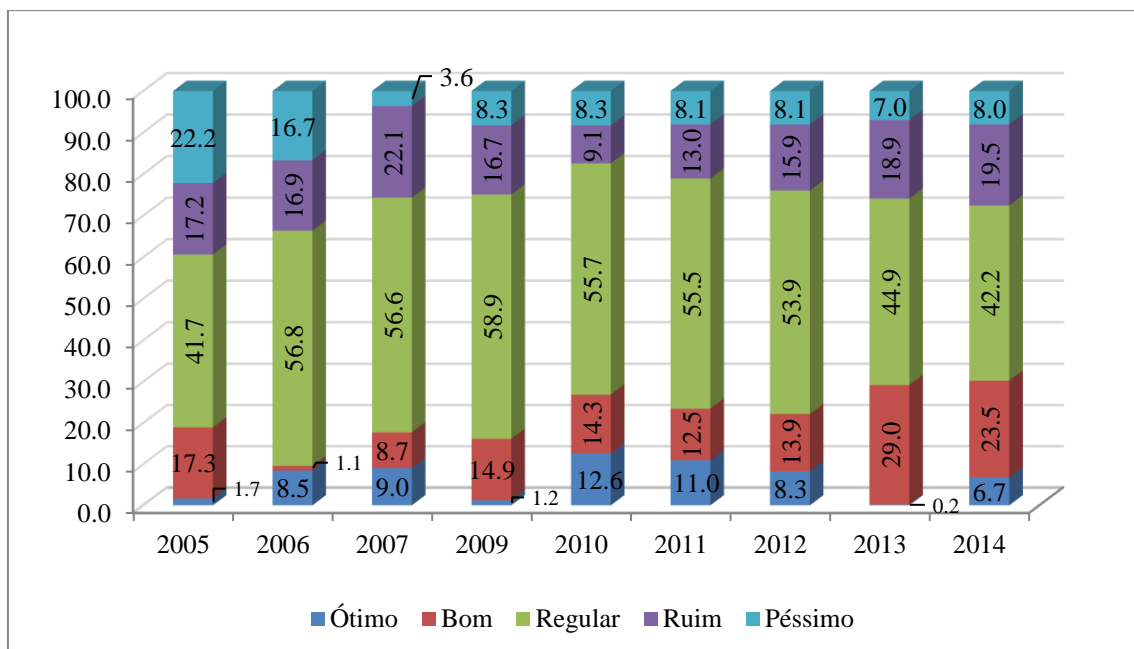


Figura 3. Conceito do pavimento das rodovias federais de Pernambuco

Fonte: Pesquisas CNT de rodovias

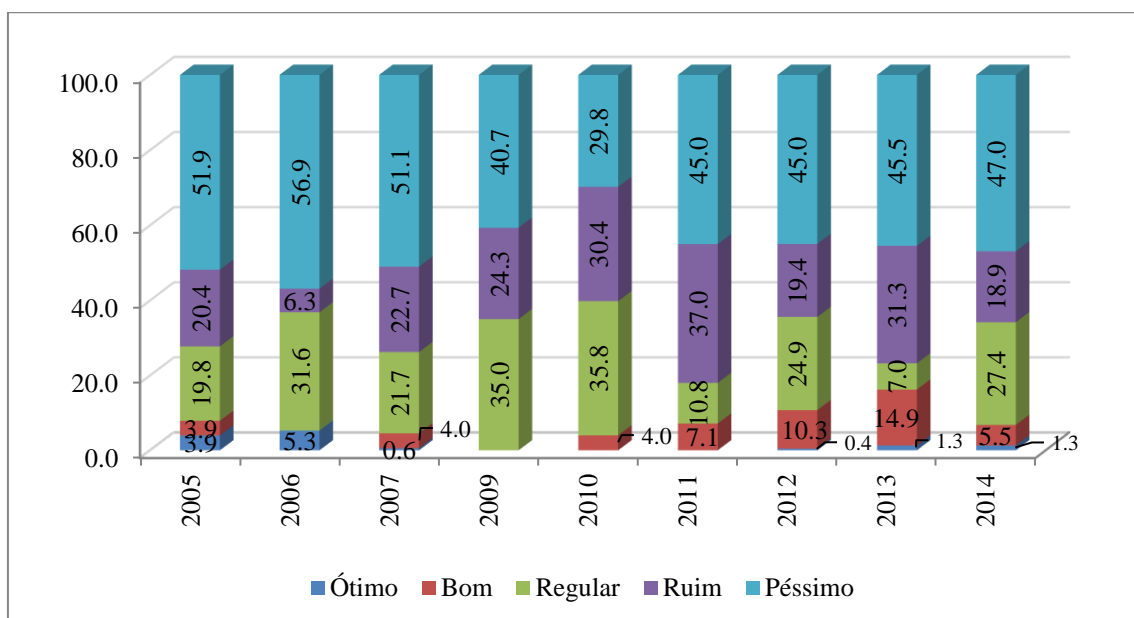


Figura 4. Conceito do pavimento das rodovias estaduais de Pernambuco

Fonte: Pesquisas CNT de rodovias

Tabela 4. Conceitos do pavimento versus índices

| Conceito do pavimento | Índice |
|-----------------------|--------|
| Ótimo | 5 |
| Bom | 4 |
| Regular | 3 |
| Ruim | 2 |
| Péssimo | 1 |

Tabela 5. Conceito geral das rodovias federais de Pernambuco para cada ano

| Ano | Índice | Conceito |
|------|--------|----------------|
| 2005 | 2.59 | Regular a ruim |
| 2006 | 2.68 | Regular a ruim |
| 2007 | 2.97 | Regular a ruim |
| 2009 | 2.84 | Regular a ruim |
| 2010 | 3.14 | Regular a bom |
| 2011 | 3.05 | Regular a bom |
| 2012 | 2.98 | Regular a ruim |
| 2013 | 2.97 | Regular a ruim |
| 2014 | 3.01 | Regular a bom |

Tabela 6. Conceito geral das rodovias estaduais de Pernambuco para cada ano.

| Ano | Índice | Conceito |
|------|--------|----------------|
| 2005 | 1.88 | Ruim a péssimo |
| 2006 | 1.90 | Ruim a péssimo |
| 2007 | 1.80 | Ruim a péssimo |
| 2009 | 1.94 | Ruim a péssimo |
| 2010 | 2.14 | Ruim a regular |
| 2011 | 1.80 | Ruim a péssimo |
| 2012 | 2.02 | Ruim a regular |
| 2013 | 1.95 | Ruim a péssimo |
| 2014 | 1.95 | Ruim a péssimo |

2.4 Frota registrada de veículos no Estado de Pernambuco

Para a obtenção da frota registrada de veículos, foram consultadas as estatísticas disponibilizadas pelo Departamento Estadual de Tránsito de Pernambuco (DETRAN/PE), por meio da sua página na Internet. Para que se tenha uma ideia dessa evolução, a frota total registrada ao final do ano de 2004 em Pernambuco era de 1,118,758 veículos, alcançando 2,627,802 ao final do ano de 2014, ou seja, um acréscimo de aproximadamente 134.9%, o que representa uma taxa média de crescimento anual de cerca de 8.9%. Sobre veículos pesados, isto é, caminhões e ônibus, a frota registrada ao final do ano de 2004 em Pernambuco era de 173,528 veículos, passando a 359,777 ao final do ano de 2014, o que corresponde a um acréscimo em torno de 107.3% ou uma taxa média de crescimento anual de cerca de 7.6%. A Tabela 7 e a Figura 5, a seguir apresentadas, indicam a evolução da frota de veículos registrados no Estado de Pernambuco durante o período de 2005 a 2014.

Tabela 7. Frota registrada de veículos no Estado de Pernambuco

| Ano | Frota registrada de veículos em PERNAMBUCO |
|------|--|
| 2005 | 1,184,920 |
| 2006 | 1,250,400 |
| 2007 | 1,363,283 |
| 2008 | 1,497,822 |
| 2009 | 1,657,531 |
| 2010 | 1,857,540 |
| 2011 | 2,074,599 |
| 2012 | 2,279,075 |
| 2013 | 2,464,189 |
| 2014 | 2,627,802 |

Fonte: DETRAN/PE.

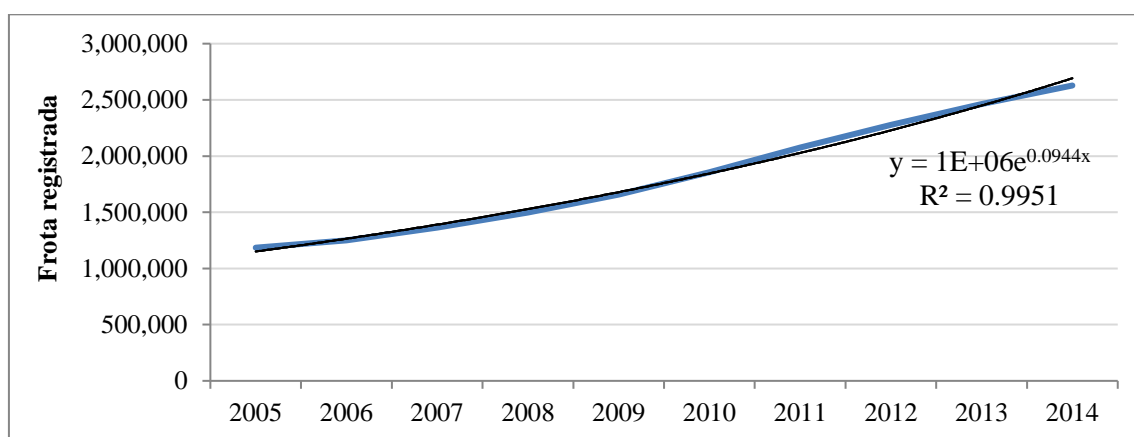


Figura 5. Evolução da frota registrada de veículos no Departamento Estadual de Trânsito de Pernambuco (2005 a 2014)

3. ANÁLISE DE REGRESSÃO LINEAR (ACIDENTES VERSUS AS OUTRAS VARIÁVEIS)

A partir do levantamento de todas as informações, foi desenvolvido um estudo de análise de regressão linear, separadamente para as rodovias federais e estaduais. No caso das rodovias federais, tendo em vista a forte colinearidade observada entre as variáveis investimento e frota, foram desenvolvidos dois modelos matemáticos, excluindo cada uma dessas variáveis por vez. No caso das rodovias estaduais, foi constatada uma baixa correlação entre as variáveis número de acidentes e índice de qualidade do pavimento, o que ensejou a exclusão desta última do modelo.

Tendo em vista a dificuldade encontrada na coleta de dados e a conseqüente disponibilidade de informações, o período de análise considerado para as rodovias federais foi de dez anos, abrangendo o período de 2005 a 2014, enquanto para as rodovias estaduais, foi de oito anos, de 2007 a 2014. O ano de 2008 foi desconsiderado em ambos os casos, pela ausência de

informações. A análise foi procedida separadamente para as rodovias federais e estaduais, conforme é logo adiante exposto.

Os parâmetros estatísticos analisados são a seguir sucintamente descritos:

- R múltiplo - representa a correlação entre as variáveis independentes e a variável dependente;
- R quadrado (R^2) - definido como “coeficiente de determinação” da amostra, é a medida mais utilizada do grau de ajuste de uma equação de regressão;
- R quadrado (R^2) ajustado - tem um significado idêntico ao R quadrado, porém ajustado levando em conta o número de variáveis independentes;
- Erro padrão - é o desvio padrão do modelo, dado pela raiz quadrada da variância.

3.1 Análises de regressão para as rodovias federais

3.1.1 Análise do modelo 1: $A = k + bI + cQ + dF$

A primeira abordagem para as rodovias federais consistiu na adoção do modelo matemático abrangente, considerando a quantidade de acidentes (A) como variável dependente e as variáveis “I”, “Q” e “F” (já caracterizadas) como independentes. Os resultados da correspondente estatística de regressão estão representados na Tabela 8.

Foi em seguida verificada a eventual existência de colinearidade entre as variáveis independentes, utilizando-se a tabela de correlação do Excel e o Fator Inflacionário de Variância (FIV) obtido através do PHStat. A tabela de correlação fornece a correlação das variáveis uma a uma, enquanto o FIV indica a correlação de uma variável com todas as outras variáveis do modelo. Os resultados dos fatores de correlação estão apresentados a seguir na Tabela 9.

Tabela 8. Resumo da estatística de regressão correspondente ao modelo 1

| | |
|-----------------------|---------|
| R múltiplo | 0.96879 |
| R quadrado | 0.939 |
| R quadrado ajustado | 0.902 |
| Erro padrão | 486.181 |
| Número de observações | 9 |

Tabela 9. Fatores de correlação

| | Acidentes (A) | Investimentos (I) | Qualidade (Q) | Frota (F) |
|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-----------|
| Acidentes (A) | 1 | | | |
| Investimentos (I) | 0.876 | 1 | | |
| Qualidade (Q) | 0.833 | 0.565 | 1 | |
| Frota (F) | 0.890 | 0.955 | 0.670 | 1 |

Por meio da Tabela 9, é possível verificar a existência de uma forte correlação (acima de 0.7) entre as variáveis I (investimentos) e F (frota), o que é prejudicial ao modelo, pois o tornaria tendencioso, não explicando de fato o número de acidentes. Essas duas variáveis tendem a crescer de forma diretamente proporcional ao aquecimento da economia.

Para verificar a necessidade de exclusão das variáveis do modelo, foram calculados os respectivos FIVs, obtendo-se os seguintes resultados:

- Investimentos: FIV= 12.737
- Qualidade: FIV= 2.054
- Frota: FIV= 15.753.

Como existem duas variáveis com FIV maior que 5, a análise de regressão linear múltipla foi refeita por mais duas vezes, excluindo uma das variáveis de cada vez.

3.1.2 Análise do modelo 2: $A = k + bI + cQ$

Nesta análise, foi excluída a variável F (frota), adotando-se agora a equação:

$$A = k + bI + cQ$$

Repetindo-se o procedimento exposto no item 3.1.1, foram obtidos os novos FIVs, obtendo-se:

- Investimentos: FIV= 1.468
- Qualidade: FIV= 1.469

Como ambos os FIVs são menores que 5, conclui-se que não há problema de colinearidade para o modelo com as duas variáveis independentes (“I” e “Q”). Os resultados da correspondente estatística de regressão estão representados na Tabela 10.

Tabela 10. Resumo da estatística de regressão correspondente ao modelo 2

| | |
|-----------------------|---------|
| R múltiplo | 0.96763 |
| R quadrado | 0.936 |
| R quadrado ajustado | 0.915 |
| Erro padrão | 451.892 |
| Número de observações | 9 |

Foram obtidos os seguintes coeficientes: $k = -7,486.13$; $b = 4,301.72$; $c = 1.08E-05$. Portanto, a equação de regressão procurada é:

$$A = -7,486.13 + 4,301.72 Q + 1.08 E - 05 I$$

3.1.3 Análise do modelo 3: $A = k + cQ + dF$

Nesta análise, foi excluída a variável I (investimentos), adotando-se agora a equação:

$$A = k + cQ + dF$$

Repetindo-se o procedimento exposto no item 3.1.1, foram obtidos os novos FIVs, obtendo-se:

- Qualidade: FIV= 1.8167
- Frota: FIV= 1.8167

Como ambos os FIVs são menores que 5, conclui-se que não há problema de colinearidade para o modelo com as duas variáveis independentes (“Q” e “F”). Os resultados da correspondente estatística de regressão estão representados na Tabela 11.

Foram obtidos os seguintes coeficientes: $k = -7,914.61$; $c = 3,772.58$; $d = 0.0017$. Portanto, a equação de regressão procurada é:

$$A = -7,914.61 + 3,772.58 Q + 0.0017 F$$

3.2 Análises de regressão para as rodovias estaduais

3.2.1 Análise do modelo 4: $A = k + bI + cQ + dF$

Assim como para as rodovias federais, foi realizada uma análise de regressão linear múltipla para as rodovias estaduais de Pernambuco, envolvendo a variável dependente “A” (acidentes) e as variáveis “I”, “Q” e “F”. Os resultados da correspondente estatística de regressão estão representados na Tabela 12.

Foi em seguida verificada a eventual existência de colinearidade entre as variáveis independentes, utilizando-se a tabela de correlação do Excel e o Fator Inflacionário de Variância (FIV) obtido através do PHStat. Os resultados dos fatores de correlação estão apresentados a seguir na Tabela 13.

Com base nas correlações apresentadas na Tabela 13, constata-se não haver colinearidade forte (maior do que 0,7) entre as variáveis independentes. No entanto, optou-se por excluir a variável “Q” (qualidade do pavimento da rodovia), devido à sua baixa correlação com a variável dependente.

Tabela 11. Resumo da estatística de regressão correspondente ao modelo 3

| | |
|-----------------------|---------|
| R múltiplo | 0.94634 |
| R quadrado | 0.896 |
| R quadrado ajustado | 0.861 |
| Erro padrão | 578.663 |
| Número de observações | 9 |

Tabela 12. Resumo da estatística de regressão correspondente ao modelo 4

| | |
|-----------------------|----------|
| R múltiplo | 0.970742 |
| R quadrado | 0.942 |
| R quadrado ajustado | 0.885 |
| Erro padrão | 164.440 |
| Número de observações | 7 |

Tabela 13. Fatores de correlação

| | Acidentes (A) | Investimentos (I) | Qualidade (Q) | Frota (F) |
|-------------------|---------------|-------------------|---------------|-----------|
| Acidentes (A) | 1 | | | |
| Investimentos (I) | 0.772 | 1 | | |
| Qualidade (Q) | 0.273 | 0.459 | 1 | |
| Frota (F) | 0.961 | 0.700 | 0.242 | 1 |

Tabela 14. Resumo da estatística de regressão correspondente ao modelo 5

| | |
|-----------------------|---------|
| R múltiplo | 0.97062 |
| R quadrado | 0.942 |
| R quadrado ajustado | 0.913 |
| Erro padrão | 142.712 |
| Número de observações | 7 |

3.2.2 Análise do modelo 5: $A = k + bI + dF$

Nesta análise, pela exclusão da variável Q (qualidade), foi adotada a seguinte equação:

$$A = k + bI + dF$$

Os resultados da correspondente estatística de regressão estão representados na Tabela 14.

Foram obtidos os seguintes coeficientes: $k = 1,114.93$; $b = 1.27E-05$; $d = 0.00085$. Portanto, a equação de regressão procurada é:

$$A = 1,114.93 + 1.27E - 05 I + 0.00085 F$$

Tabela 15. Equações de regressão, respectivos coeficientes de determinação e jurisdição (federal ou estadual)

| Equação | R ² | Rodovias |
|--|----------------|-----------|
| $A = -7,486.13 + 4,301.72 Q + 1.08 E - 05 I$ | 0.936 | Federais |
| $A = -7,914.61 + 3,772.58 Q + 0.0017 F$ | 0.896 | Federais |
| $A = 1,114.93 + 1.27E - 05 I + 0.00085 F$ | 0.942 | Estaduais |

3.3 Resumo das equações de regressão obtidas

Apresenta-se na Tabela 15 um resumo das equações obtidas com seus respectivos coeficientes de determinação.

4. COMENTÁRIOS SOBRE AS ANÁLISES DE REGRESSÃO REALIZADAS

4.1 Relação entre a quantidade de acidentes e os investimentos realizados na manutenção rodoviária

Nas duas análises de regressão linear múltipla nas quais a variável “I” aparece, chama a atenção o fato de que os seus respectivos coeficientes são positivos. Na realidade, esperava-se que o coeficiente relacionado à variável “I” fosse negativo, tendo em vista que a maiores investimentos na manutenção rodoviária deveria corresponder uma redução no número de acidentes. Novas pesquisas estão sendo iniciadas para tentar explicar essa questão paradoxal. A princípio, a explicação pode ser atribuída às hipóteses elencadas a seguir.

1ª) Por ocasião da coleta de dados junto aos respectivos órgãos rodoviários (DNIT e DER/PE), as informações a respeito dos investimentos realizados na manutenção rodoviária em cada ano não faziam referência ao mês ou aos meses efetivos de aplicação dos recursos. É possível, por exemplo, que alguns investimentos tenham sido realizados no final do ano e os resultados quanto à redução de acidentes só viessem a surgir no ano subsequente.

2ª) Há dúvidas quanto à eficácia dos recursos utilizados na manutenção. Em alguns dos anos do período de análise, por exemplo, houve uma campanha de operação “tapa-buraco” em larga escala, visando atenuar o grave estado de deterioração do pavimento de muitas rodovias no País. Esses serviços são meros paliativos, que não resolvem o problema e apresentam vida útil muito efêmera. Em muitos casos, em decorrência do material utilizado (principalmente pré-misturado a frio), a recomposição do pavimento não resiste a um período chuvoso e a situação volta a ser como antes. Ou seja, o investimento ocorreu, mas não resultou em ganhos efetivos com relação à redução de acidentes.

3ª) Por dificuldades burocráticas ou por falhas no gerenciamento, não há prioridades claramente definidas quanto à aplicação de recursos em segmentos de rodovias nos quais há uma elevada ocorrência de acidentes de trânsito. Além disso, emendas parlamentares em muitos casos destinam recursos para onde não há prioridade de investimento.

4.2 Relação entre a quantidade de acidentes e a qualidade do pavimento da rodovia

Da mesma maneira, nas duas análises de regressão linear múltipla nas quais a variável “Q” aparece, chama a atenção o fato de que os seus respectivos coeficientes são positivos. Na realidade, também se esperava que o coeficiente relacionado à variável “Q” fosse negativo, tendo em vista que, quanto melhor a qualidade da superfície do pavimento, maior é o valor dessa variável, o que igualmente deveria ensejar uma redução no número de acidentes.

Há inegáveis evidências quanto à relação existente entre a qualidade da superfície do pavimento e a ocorrência de acidentes (Moreira e Vasconcelos, 2014). Há inúmeros trechos de rodovia, abordados em outra linha de pesquisa dos mesmos autores, para os quais a elevada quantidade de acidentes é devida às más condições da superfície do pavimento. Ocorrências em grande número de acidentes do tipo “colisão traseira” (característico da situação em que o usuário, ao perceber um defeito na pista, freia bruscamente o veículo e provoca a colisão do veículo que vem atrás) ou do tipo “abalroamento no mesmo sentido” (típico da situação na qual o usuário, ao perceber um defeito na pista, tenta mudar abruptamente de faixa de trânsito e colide com o veículo que transita ao seu lado) demonstram essa afirmativa.

Poder-se-ia argumentar que um pavimento em perfeitas condições pode proporcionar o desenvolvimento de maiores velocidades, o que, por sua vez, poderia ser um fator causador de acidentes. Mas, evidentemente, pavimentos em mau estado não correspondem a situações que a sociedade espera das suas rodovias, tendo em vista o que proporcionam em termos de outros aspectos, como o desconforto e as deseconomias causadas pelo acréscimo nos tempos de viagem e no aumento no custo operacional dos veículos. Existem dispositivos legais que limitam a velocidade máxima permitida nas rodovias com segurança, o que anula a linha de raciocínio exposta no início deste parágrafo.

4.3 Relação entre a quantidade de acidentes e a frota registrada de veículos

Nas duas análises de regressão linear múltipla nas quais a variável “F” aparece, os seus respectivos coeficientes são positivos, como era de se esperar.

Na equação obtida para as rodovias federais, o coeficiente obtido foi 0.0017, o que significa dizer que, a um aumento de 10,000 veículos na frota registrada, corresponderia um acréscimo de 17 acidentes de trânsito nas rodovias. Já para as rodovias estaduais, o coeficiente obtido (0.00085) foi exatamente a metade. Mais veículos na frota registrada representam maiores volumes de tráfego nas rodovias, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de acidentes.

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conclui-se, por todo o exposto, sobre a importância de analisar variáveis que procurem explicar a elevada ocorrência de acidentes de trânsito, no intuito de se adotar procedimentos que procurem minimizá-los.

Recomenda-se prosseguir a linha de pesquisa com diversos aspectos abordados neste artigo e manter intercâmbio com outros pesquisadores que tenham interesse no tema, de tanta relevância em todo o mundo.

REFERÊNCIAS

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DOS TRANSPORTES, CNT. (2014). *O que o Brasil precisa em Transporte e Logística: Propostas da CNT aos Candidatos à Presidência*. CNT, Brasília.

DEPARTAMENTO ESTADUAL DE TRÂNSITO DE PERNAMBUCO - DETRAN/PE. (s.f.). *Estatísticas*. Disponíveis em: <<http://www.detrان.pe.gov.br>>.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. (s.f.). *Estatísticas de Acidentes Rodoviários*. Disponíveis em: <<http://www.dnit.gov.br>>.

LÔBO, G. F.; BEZERRA, R. P. L. (2015). *Uma Abordagem Estatística sobre os Acidentes nas Rodovias de Pernambuco* (Trabalho de Conclusão de Curso). UFPE, Recife.

MOREIRA, M. R. P. (2013). *O Sistema Rodoviário Brasileiro*. Recife.

MOREIRA, M. R. P. e VASCONCELOS, F. J. de (2014). *La ocurrencia de accidentes de tránsito y su Relación con los Aspectos de la Ingeniería de la Vía*. Actas del XI Congreso de Ingeniería del Transporte (CIT 2014), 9-11 Junho 2014. Santander, Espanha.

61 Participación de usuario vulnerable en la siniestralidad de las carreteras mexicanas

Emilio Fco. Mayoral Grajeda

Ana Cecilia Cuevas Colunga

Instituto Mexicano del Transporte, México

RESUMEN

El objetivo es conocer y difundir información estadística sobre la participación del usuario vulnerable en la siniestralidad de las carreteras mexicanas y corroborar que una mayor interacción entre los vehículos automotores y el usuario vulnerable están provocando un incremento de atropellamientos. La metodología de la investigación es deductiva con un enfoque cuantitativo, se parte de que la fuente primaria de datos está en los Hechos de tránsito que registró la Policía Federal. La generación y análisis estadístico de la siniestralidad está acotado de 2010 a 2013. El alcance abarca los siniestros ocurridos en la red carretera con la participación del usuario vulnerable.

Como resultado de esta investigación aplicada se obtuvieron datos que permiten: I) conocer la situación actual de la siniestralidad, II) continuar con la evolución histórica del seguimiento de los atropellamientos, III) contar con elementos para valorar el deterioro a la seguridad vial para el usuario vulnerable causado por el diseño geométrico en carreteras y la priorización del transporte motorizado, IV) ofrecer algunos lineamientos concretos para proteger al usuario vulnerable desde el punto de vista de la infraestructura, el vehículo, el reglamento y el comportamiento del usuario y, V) establecer el punto de partida para la formulación de otras investigaciones con mayor nivel de profundidad.

Palabras clave: usuario vulnerable, siniestralidad, estadística, carreteras

1. ANTECEDENTES

Después de realizar varios estudios de seguridad vial en carreteras mexicanas, se tiene la hipótesis de que los factores de riesgo se han incrementado en los últimos años debido a una mayor interacción del usuario vulnerable (UV) con vehículos automotores en las carreteras, lo que está ocasionando una mayor siniestralidad y severidad entre estos actores; además, una característica del UV es que no dispone de una protección externa, como un conductor de vehículo automotor y, que existe una importante diferencia de masa entre el UV y los vehículos con los que se impactan. Como UV se considera al peatón, ciclista, motociclista y jinete.

Antes de exponer las estadísticas de la siniestralidad del UV, se ha observado que algunas actividades se han incrementado en los últimos años, en consecuencia, aumentó el grado de exposición. Estas actividades son: a) el cambio de la movilidad tradicional por el desplazamiento a pie, en bicicleta o motocicleta para dirigirse al lugar de trabajo, a la escuela, etc.; b) el hábito de las personas en zonas rurales de caminar a un pueblo adyacente y regresar y; c) los usuarios que hacen deporte (correr, trotar) en zonas adyacentes al paso de vehículos, tanto en zonas urbanas como en carreteras.

El uso de la bicicleta ha aumentado entre los usuarios frecuentes de bicicleta y se ha extendido a los usuarios habituales de otros medios de transporte, principalmente por: i) una mayor accesibilidad a las bicicletas de uso público (p. ej. la Ciudad de México que ofrece la posibilidad de circular con bicicletas públicas y facilita el estacionamiento mediante las cicloestaciones diseñadas para tal fin); ii) una mejora de la infraestructura vial para bicicletas (algunas autoridades han construido carriles exclusivos para bicicletas en vialidades urbanas y carreteras); iii) el aumento del uso de la bicicleta de uso deportivo como consecuencia de las promociones de salud (p. ej. la práctica de bicicleta de montaña o de carreras) y; iv) un incremento en las actividades lúdicas como pasear, hacer un recorrido o salir a explorar una zona determinada son algunas de las prácticas habituales que contemplan el uso de la bicicleta (SMA-DF, 2011).

En las vialidades urbanas se percibe una falta de respeto hacia el UV por parte de los conductores de vehículos automotores, sin embargo también se ha dicho que estos usuarios cargan con una cierta culpabilidad, principalmente al cruzar la vialidad, transitar sobre el arroyo vial, no utilizan la infraestructura provista para ellos, no respetan el señalamiento, principalmente el semáforo o señal de alto; sin embargo, desde el punto de vista de salud pública, se considera que el problema del atropellamiento ha sido poco estudiado en las carreteras, especialmente en México (Hijar, 2012). En general las acciones emprendidas han estado orientadas hacia el conductor y ocupantes del vehículo automotor y poco al resto de los actores en la circulación vial. De ahí la importancia de iniciar con una investigación exploratoria más rigurosa orientada a conocer la situación que guarda la siniestralidad en las carreteras mexicanas con la participación del UV.

2. LOS ACCIDENTES VIALES

En nuestro país la seguridad vial está condicionada por los volúmenes de tres factores principales: la población, el parque vehicular y la infraestructura vial. En relación con la población, en 2013 México tenía alrededor de 118.4 millones de habitantes con una esperanza de vida de 76 años y una tasa media de crecimiento anual de 1.8% (CONAPO, 2014). En relación con los vehículos, a partir de este siglo el parque vehicular ha venido en aumento de 15.6 en 2000 a 36.7 millones de vehículos en 2013 (destacando las motocicletas con un incremento exponencial); la tasa de motorización de 310.32 vehículos por cada mil habitantes. Respecto a la infraestructura se cuenta con una amplia red carretera de alrededor

de 379 mil kilómetros (44.7% de caminos rurales, 22.5% de caminos alimentadores, 19.7% de brechas mejoradas y 13.1% de carreteras troncales); la tasa de crecimiento de las carreteras pavimentadas entre 2012 y 2013 fue de 1.4%, destacando el incremento en capacidad y especificaciones técnicas (SCT, 2014).

La accidentalidad vial es resultado de una situación en la que influyen dos factores fundamentalmente, el crecimiento poblacional y vehicular asociado a la dinámica económica del país y la carencia de mecanismos efectivos de control a la tendencia natural de agravamiento del problema, derivada del primer factor. Por ejemplo, INEGI reportó que los accidentes de tránsito en zonas urbanas y suburbanas ascendieron a 406,426 colisiones, 121,647 lesionados no graves y 31,320 lesionados graves en 2013; las cifras anteriores muestran un descenso del 19.8% en accidentes y 20.3% en lesionados y un aumento del 3.3% en muertos con respecto a lo registrado en 2007 (INEGI, 2014). Asimismo, el Consejo Nacional para la prevención de accidentes informó que en los rangos de edad de 5 a 29 años fue la segunda causa de muerte y por cada persona que falleció, dos sufren una discapacidad (ST-CONAPRA, 2014). Con las cifras anteriores se obtiene que cada día 43.4 personas murieron y 86.8 resultaron lesionados obteniéndose una tasa de mortalidad de 13.4 muertos por cada 100 mil habitantes.

Respecto a la evolución de los accidentes en zonas urbanas y suburbanas por tipo de UV del 2007 al 2013, se obtuvo un descenso del 25.7% en el número de accidentes con participación de peatones y del 17.7% para ciclistas; en cambio las motocicletas registran un incremento considerable a partir del 2011 con el 37.2% (ST-CONAPRA, 2014).

Por otra parte, autoridades locales han apoyado e impulsado el florecimiento de una movilidad sustentable mediante el uso de la bicicleta, la caminata y el transporte público de pasajeros; desafortunadamente estas acciones no están, en la mayoría de los casos, acompañadas de una planificación urbana, infraestructura, promoción de conductas seguras y un marco normativo que proteja al UV. Bajo estas circunstancias a continuación se presenta la estadística de la siniestralidad del UV en la Red Carretera Federal (RCF).

3. SINIESTRALIDAD DEL UV EN LA RCF

3.1 Saldos de accidentes del UV

A partir de los datos registrados por la Policía Federal (PF) respecto a los siniestros viales en la red carretera vigilada por tal organismo, se obtuvo que del periodo 2010 a 2013 los saldos con la participación del UV es de 7,664 accidentes, 2,498 muertos y 7,339 lesionados (PF, 2014 y SAADA, 2012). Lo anterior representa el 7.8, 14.2 y 7.4%, respectivamente del total registrado en la RCF; sobresale mencionar la gravedad de las colisiones con participación del UV, ya que si bien su proporción en accidentes es del 7.8%, la mortandad aumenta al 14.2%. En el 95.5% de los accidentes se registraron víctimas.

En la Figura 1 se muestra la evolución de los accidentes por tipo de UV, observándose a nivel general un ligero descenso en 2011, pero posteriormente ha ido en aumento el número de accidentes; en el caso particular de las motocicletas, éstas han sufrido un incremento del 25.6%, los peatones, no obstante el aumento, en el último año presentan un descenso del 22.6%, las bicicletas mantienen una constante de 230 accidentes por año y, los jinetes no tienen presencia, aunque en los últimos dos años se registraron doce y ocho atropellamientos de jinetes.

La Figura 2 presenta la evolución de las víctimas (muertos y lesionados) en siniestros viales con participación del UV; no obstante, el descenso de víctimas totales en 2011 y 2012 se obtuvo un incremento del 5.6% entre 2010 y 2013, las víctimas en motocicletas crecieron un 33%, los peatones registran una disminución del 25.9%, las bicicletas mantienen un promedio de 285 víctimas por año y, los jinetes registran en los últimos años 17 y 7 víctimas.

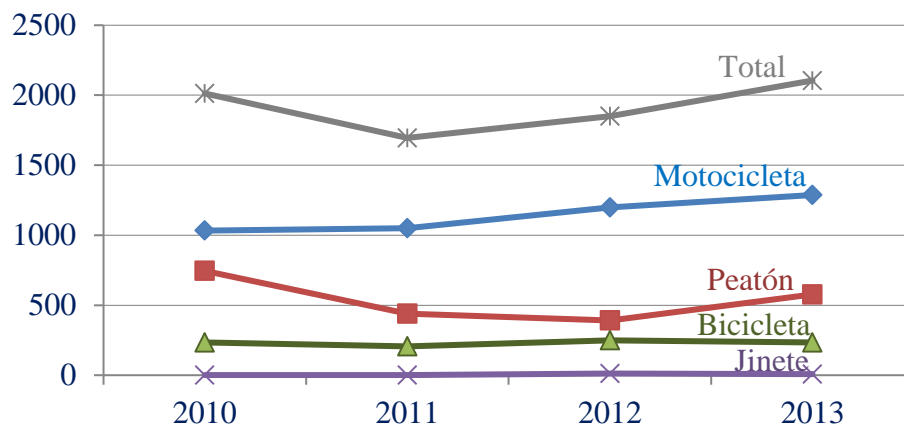


Figura 1. Evolución de accidentes por tipo de UV en la RCF

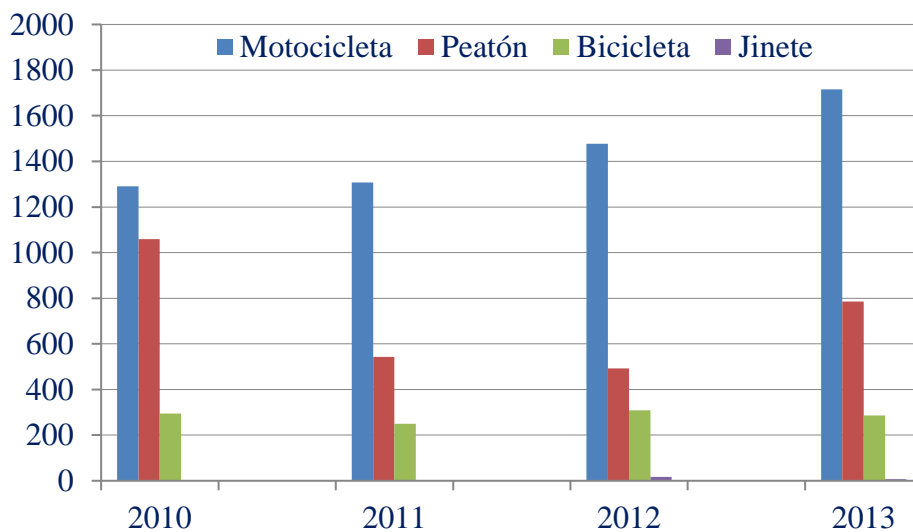


Figura 2. Evolución de las víctimas por tipo de UV en la RCF

3.2 Saldos por entidad federativa

La proporción de colisiones por estados que involucra al UV con respecto al total de siniestros que ocurrieron en cada estado durante el periodo de análisis en la RCF, se presenta en la Figura 3. La media nacional fue 7.8% de accidentes, 14.3% de muertos y 7.5% de lesionados; sobresalen Nuevo León, Querétaro, Quintana Roo y Tabasco que presentan una elevada proporción de muertes del UV y una baja proporción de accidentes; también se obtuvo que Yucatán registra un percentil que supera el 40% de los muertos y Campeche, Distrito Federal, Guanajuato y Morelos con cifras superiores al 20%; lo anterior corrobora la gravedad de un siniestro vial con participación del UV.

Además, se obtuvo una serie de mapas que muestran la evolución de accidentes, lesionados y muertos, así como su tasa de crecimiento de 2010 a 2013, por entidad federativa. La Figura 4 muestra lo correspondiente a los muertos.

3.3 Tipo de UV y su responsabilidad

Bajo ciertas restricciones el UV puede transitar por la RCF, interactuando con el flujo vehicular, en algunos casos causan conflicto vial que puede finalizar en una colisión, ya sea como responsable o involucrado. El UV cuando participa en un siniestro vial es responsable en promedio en seis de cada diez. En el caso particular del peatón, ciclista y motociclista los porcentajes promedio son 51.7, 66.5 y 61.3 respectivamente; en el caso del jinete se le atribuye 20 de los 22 eventos en los que participó.

3.4 Saldos por carretera

De la infraestructura carretera se obtuvo información de las carreteras y tramos con el mayor número de colisiones con la participación de UV y que coincide con el mayor número de víctimas en el periodo de análisis. Las carreteras con mayores cifras se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Carreteras con el mayor número de saldos de colisiones con participación del UV en la RCF de 2010 a 2013

| Nombre de carretera | Accidentes | Muertos | Lesionados |
|-----------------------------------|--------------|------------|------------|
| Coatzacoalcos - Villahermosa | 132 | 55 | 108 |
| Tepic - Mazatlán | 124 | 32 | 131 |
| Coatzacoalcos - Salina Cruz | 102 | 20 | 114 |
| Querétaro - San Luis Potosí | 99 | 35 | 86 |
| Reforma Agraria - Puerto Juárez | 99 | 44 | 63 |
| Puebla - Córdoba (cuota) | 95 | 39 | 69 |
| Entronque Playa Azul - Manzanillo | 95 | 11 | 99 |
| Los Mochis - Ciudad Obregón | 92 | 41 | 71 |
| Malpaso - El Bellote | 92 | 32 | 98 |
| Culiacán - Los Mochis | 91 | 26 | 93 |
| Total | 1,021 | 335 | 932 |

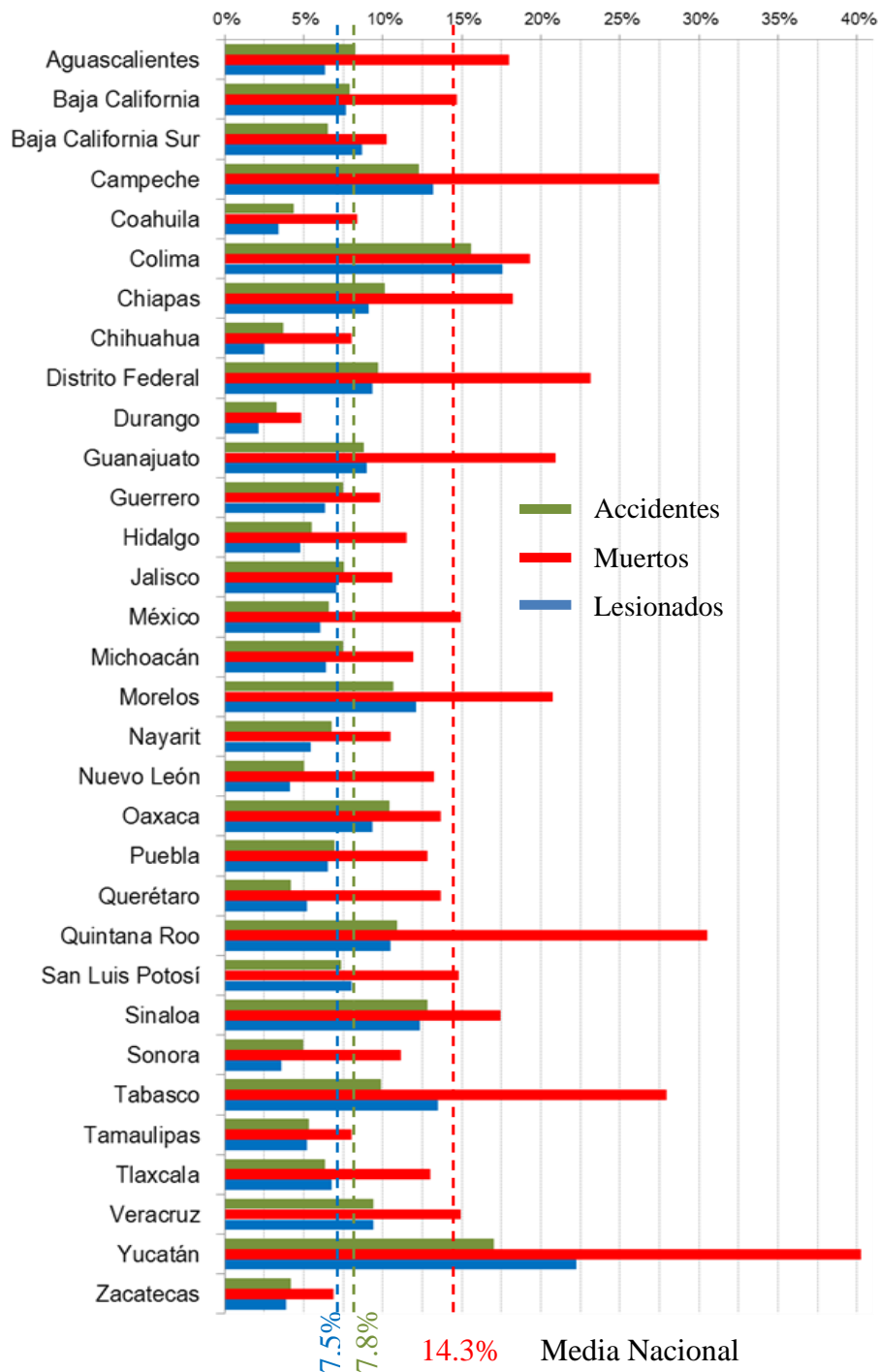


Figura 3. Proporción de saldos con participación del UV, por entidad federativa con respecto al total de siniestros en la RCF de 2010 a 2013

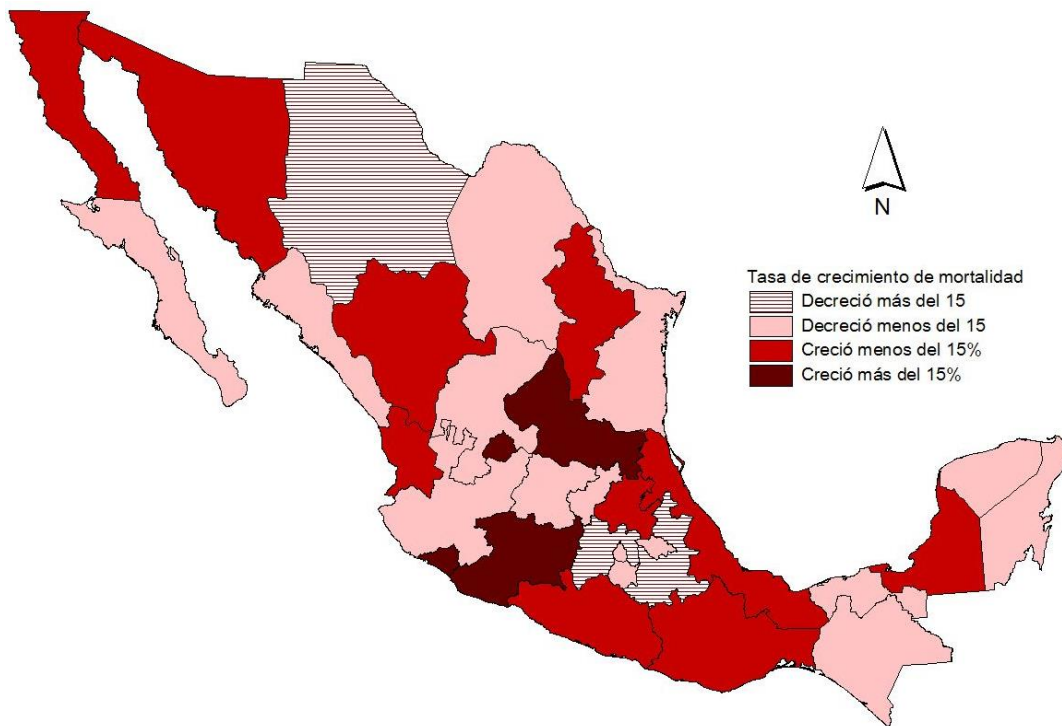


Figura 4. Evolución de la proporción de fallecidos que involucra al UV de 2010 a 2013

3.4 Temporalidad de las colisiones

La Figura 5 presenta la temporalidad de las colisiones con participación del UV a lo largo de los meses dentro del periodo de análisis del estudio. Se observa una media mensual de 639 siniestros, 611 lesionados y 208 muertos siendo diciembre el mes con mayores saldos (722, 867 y 270) y julio con menores saldos (550, 179 y 491).

La distribución diaria de los accidentes con participación del UV se muestra en la Figura 6. Se observa que durante las primeras horas del día la siniestralidad es muy baja, de las siete a las ocho horas del día se presenta un primer aumento de la siniestralidad, posteriormente vuelve a descender manteniéndose estable hasta las últimas horas del día, de 20 a 23 h es el rango que presenta la mayor concentración de saldos.

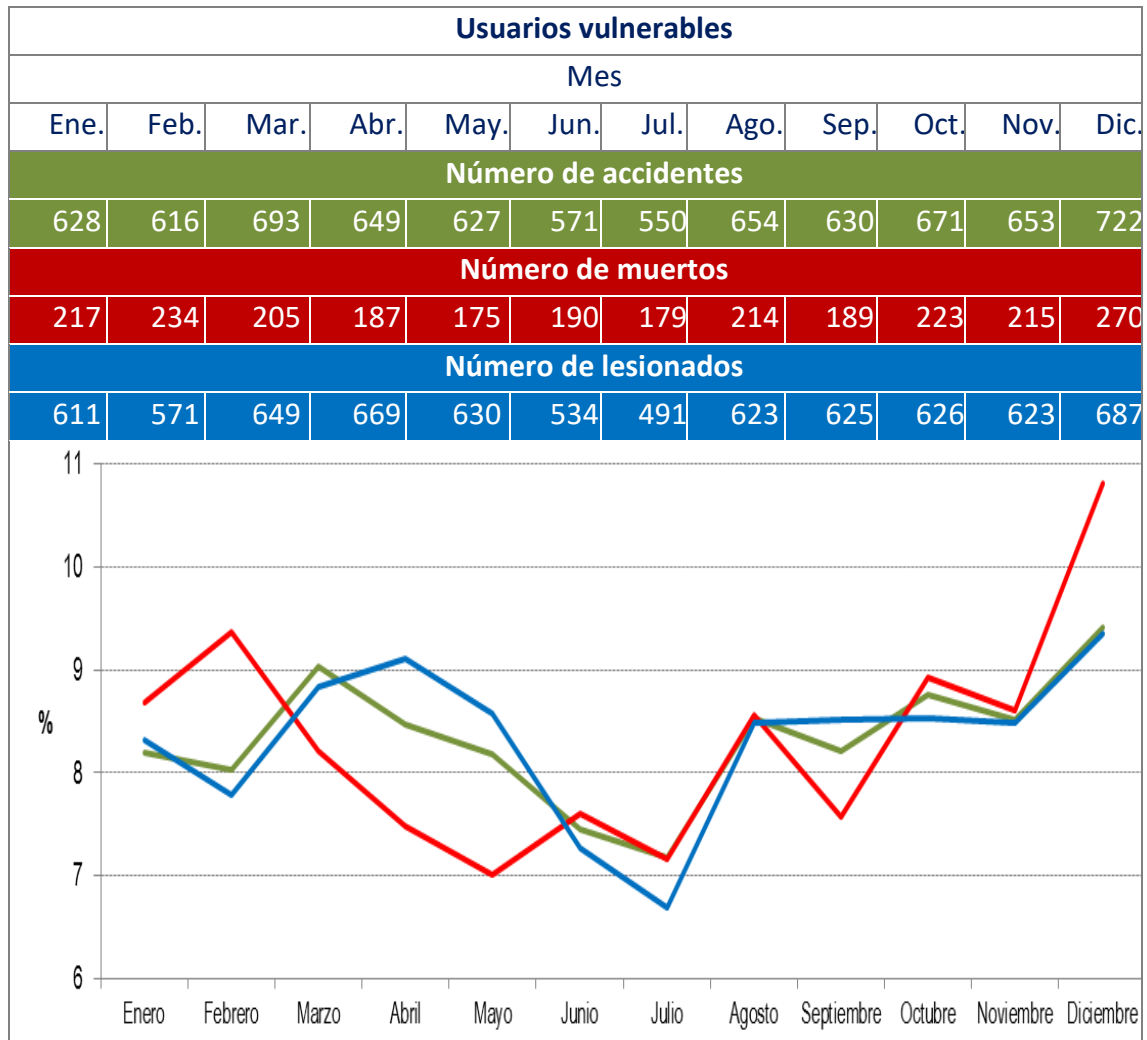


Figura 5. Temporalidad mensual de las colisiones con participación del UV de 2010 a 2013

4. ANÁLISIS PARTICULAR POR TIPO DE UV

Según un informe de la Organización Mundial de la Salud (OMS), el UV corre un riesgo mucho mayor de fallecer por kilómetro recorrido. Los kilómetros recorridos junto a otros factores como la potencia del vehículo, la frecuencia de uso, el motivo de desplazamiento o el tipo de vialidad por la que circulan, son algunas de las variables más importantes para medir la exposición al riesgo de sufrir un atropellamiento (OMS, 2004). Si clasificamos los factores de riesgo del UV en factores humanos, del vehículo y del entorno, se tiene que los primeros son el principal factor y que está relacionado con fallas o errores de estos usuarios al responder o reaccionar ante diferentes situaciones del tránsito.

Para los análisis que se muestran a continuación se utilizaron los datos de accidentes ocurridos en la RCF del 2010 por ser la más completa, ya que la cantidad y calidad de los datos fue la mejor, además se contó con una copia de los Hechos de tránsito.

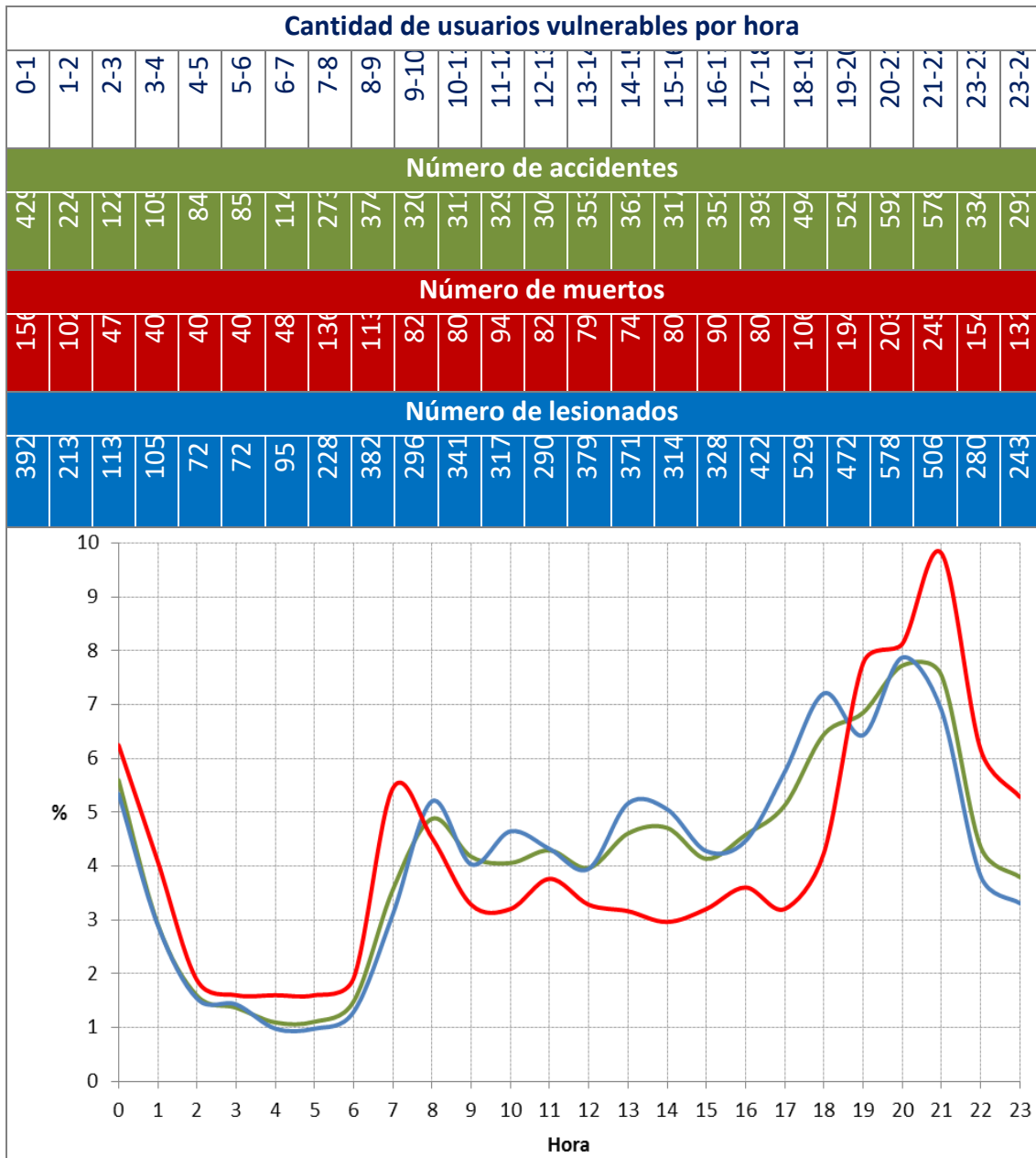


Figura 6. Temporalidad diaria de las colisiones con participación del UV de 2010 a 2013

4.1 Peatón

La participación directa del peatón en la RCF durante 2010 registró 733 accidentes, 374 muertos, 510 lesionados con una relación de 1.21 víctimas por accidente. De acuerdo a lo reportado por la PF en 46 de cada 100 atropellamientos señalan como responsable al peatón. En promedio ocurren 61 atropellamientos por mes y los meses que acumulan mayor cantidad son marzo (76), abril (72), diciembre (72) y mayo (71) y con menores cifras están junio y julio (38 y 46). Para el caso de las víctimas mortales el promedio también es de 20 por mes y los meses de enero y marzo son los que registran mayor número de víctimas con 26 cada uno. Por días de la semana resulta que los fines de semana acumulan el 50% de los atropellamientos y de las víctimas. Y durante las horas del día, se destaca el periodo de las

18 a las 23 h que agrupa más de un tercio de los atropellamientos y el 42% de los muertos; y por la mañana el periodo de las siete a las nueve horas (69 accidentes, 36 muertos y 46 lesionados).

No obstante que los atropellamientos ocurren en torno al 50% en periodo diurno, la severidad (en cuanto a la mortalidad) de los impactos a peatones durante la noche aumenta. De día 141 muertos y 377 accidentes (0.37 muertos por accidente) y por la noche la relación aumenta a 0.65.

Los tipos de vehículos que están implicados en los atropellamientos son los vehículos ligeros (sedán y pick-up) con el 68.8%, el 12.4% son contra vehículos de carga y el 14.1% no se tiene información debido a que el vehículo se retiró del lugar del accidente.

La agrupación de víctimas por atropellamiento en rangos de edad, señala que los menores de 15 años concentran el 9.6%, los jóvenes y adultos, aunque registran cifras mayores, no se aprecia ninguna tendencia; los peatones de la 3ª edad agrupan el 12.4%. Para el 20.9% no se cuenta con información de la edad de la víctima y el 70.2% corresponde a peatones del género masculino.

De los hechos de tránsito se obtuvo información de las características de las carreteras, al combinar el tipo de carretera (número de carriles y con o sin acotamiento) con los saldos de los atropellamientos resultó que en las carreteras de cuatro o más carriles concentran el 50.5% de los eventos, el 56.7% de los muertos y el 42.2% de los lesionados; en cambio las de dos carriles sin y con acotamiento registraron valores de 26.9, 24.1 y 26.1%, respectivamente. Y al combinar los alineamientos horizontal y vertical se reflejó que una particularidad de los atropellamientos es que se localizan en tangente (82.8% de los casos) y a nivel (70.9%); en pendiente descendente ocurre el 19.8% que también está muy vinculada con tramos en tangente. En curvas cerradas e intersecciones se registran pocos atropellamientos. La distribución de las víctimas obedece a un comportamiento muy similar.

Se identificaron los diferentes escenarios en los que ocurren los atropellamientos, por tipo de carretera. En términos generales se identificaron dos tipos de impacto: el frontal y el lateral que agrupan el 42% del total; entre ellos, dos de cada tres son frontales; además la distribución de víctimas es más severa en el frontal (tres de cada cuatro muertos). También se agruparon otros tipos destacando el atropellamiento al peatón cuando está parado o caminando sobre el acotamiento o la calzada (19.1% del total, 14.2% de los muertos y 27.5% de los lesionados); en la parada del autobús ocurre el 6.5% de los atropellamientos, el 7% de los muertos y el 9.6% de los lesionados. Del 25% de los atropellamientos se desconoce el tipo de impacto.

Algunos factores asociados a los atropellamientos que vale la pena mencionar es el desconocimiento de las reglas que deben guiar su comportamiento cuando circula por la

carretera, el subestimar desde el punto de vista perceptual la velocidad de los automóviles, el “afán” para llegar a un lugar, la incompreensión de las señales de seguridad para desplazarse por los caminos, el jugar en la vía, y más recientemente, se ha identificado como factor de riesgo el uso de las tecnologías móviles (Barrero et al., 2013).

4.2 Ciclista

Para este tipo de usuario se obtuvieron los siguientes saldos: 237 accidentes, 104 muertos (tres de ellos pertenecen a un vehículo automotor), 190 lesionados (52 ellos pertenecen a un vehículo automotor) y 241 bicicletas involucradas con una relación de víctimas de 1.24 víctimas por accidente. De acuerdo a lo reportado por la PF en dos de cada tres incidentes señalan como responsable al ciclista y en esa misma proporción (68%) es responsable de las víctimas. En promedio ocurren 20 siniestros por mes y los meses que acumulan mayor cantidad son enero (26), marzo (24), junio (24) y octubre (23) y con menores cifras están julio (14) y noviembre (15). Para el caso de las víctimas el promedio también es de 20 por mes y los meses de enero y marzo son los que registran mayor número de víctimas con 26 cada uno. El día sábado es el que presenta mayor número de siniestros y víctimas con 44 y 46, respectivamente acumulando el 18% de la semana. En cuanto a las horas del día, sobresale las ocho de la mañana que acumula más del 10% de los saldos (26 accidentes, 10 muertos y 16 lesionados); y por la noche el periodo de las 19 a las 22 horas (46 accidentes, 20 muertos y 25 lesionados). Aunque el 59% de las colisiones ocurren durante el periodo diurno cabe señalar que la severidad (en cuanto a la mortalidad) de los choques nocturnos suele ser mayor. Durante el día se registraron 53 muertos y 140 accidentes (0.38 muertos por accidente) y por la noche 48 muertos y 97 accidentes (0.49 muertos por accidente).

En cuanto a los tipos de vehículos implicados en accidentes con ciclistas, los vehículos ligeros (sedán y pick-up) están involucrados en el 57.4%, los vehículos de carga en el 13.5% y en el 16.9% de los casos no se tiene información debido a que el vehículo se retiró del lugar del accidente.

En la participación de los ciclistas muertos y lesionados por rangos de edad, se obtuvo el valor máximo de 20 a 24 años con 23 víctimas (15 lesionados y 8 muertos), seguido por el rango de 65 a 69 años con 20 (14 lesionados y 6 muertos). Del rango de 10 a 24 años acumulan la quinta parte de las víctimas, de 30 a 64 mantienen un promedio de 15 víctimas por rango de edad. Cabe mencionar que del total de víctimas, para el 13.8% no se cuenta con información de edad de la víctima. El 97.5% corresponde a ciclistas del género masculino.

Al combinar los accidentes y el alineamiento se observa que mayoritariamente (81.4% de los casos) estos se producen en una sección en tangente, 12.2% en una intersección y 6.3% en curva. La distribución de las víctimas obedece a un comportamiento muy similar. La distribución de los saldos en función del tipo de carretera (número de carriles y con o sin acotamiento) resultó que el 56.9% de los percances ocurren en carreteras de cuatro o más carriles, el 24.4 y 18.7% en carreteras de dos carriles sin y con acotamiento, respectivamente.

En el análisis de los diferentes escenarios de la colisión con la participación de la bicicleta, por tipo de carretera, muestra que para todas las carreteras, el impacto lateral se presenta en dos de cada tres, sin embargo el impacto frontal y por alcance, aunque son menos frecuentes, tienen un efecto mayor en las víctimas, principalmente en el número de muertos.

En un colisión el impacto primario se da con la bicicleta y las extremidades inferiores del ciclista a baja velocidad, a mayor velocidad el cuerpo del ciclista salta sobre la parte frontal del vehículo y la cabeza golpea casi siempre contra el cofre o el parabrisas; y en ocasiones a mayores velocidades, el cuerpo del ciclista golpea contra el techo del automóvil o sale despedido contra el pavimento ocasionando que su cabeza se golpeé contra el suelo.

No parece que la causa de los accidentes se deba al estado psicofísico de los ciclistas. Los registros indican que la gran mayoría circulaba en condiciones normales, tampoco se identificaron desperfectos en la bicicleta, de forma aislada se mencionan defectos mecánicos (luces/reflejantes y frenos). Los oficiales de la PF señalan a la distracción, los giros incorrectos, circular fuera del área, no respetar el señalamiento (señal de alto o ceda el paso), e invadir el sentido contrario como los tipos de infracción más comunes y respecto a las infracciones cometidas por los conductores que dieron lugar a un accidente con ciclistas sobresalen: la velocidad inadecuada, los rebases antirreglamentarios y los giros incorrectos. No se menciona como un hecho relevante algún desperfecto o condición adversa en el estado físico de la carretera (baches, arena suelta, objetos sobre el camino, etc.).

4.3 Motociclista

De la muestra se obtuvo que el 75.5% de los accidentes con motocicleta son múltiples (dos o más participantes) y el 24.5% son unitarios. El total de personas lesionadas es de 941 (690 conductores y 251 pasajeros), el total de fallecidos es de 219 (185 conductores y 34 pasajeros), 46 resultaron ilesos y de 44 no se tenía el dato. También se observa que en el 58.5% de los casos es responsable el motociclista y el 41.5% restante es sólo involucrado; asimismo en nueve de cada diez siniestros resulta algún lesionado y en más de dos por cada diez se registra un fallecido, en solo el 4.7% de los casos no hay víctimas.

Las motocicletas muestran una tasa de severidad mayor que la cantidad total de vehículos siniestrados; es decir, en 965 accidentes se contabilizaron 1,160 víctimas (1.2 víctimas/accidente); sin embargo, la severidad aumenta para el caso específico de los accidentes unitarios con 1.5 víctimas/accidente (236 accidentes y 355 víctimas). Cuando la colisión es múltiple, la relación víctimas/accidente disminuye a 1.0. Solamente en 122 hechos de tránsito se reportó el uso del casco resultando que en el 70.5% de los casos, el motociclista no portaba el dispositivo de protección.

En cuanto a la temporalidad de los siniestros a lo largo del año no se observa ninguna tendencia; febrero es el mes con menos accidentes (64) y mayo el de mayor registro con 89; en promedio se registran 74 siniestros mensuales con participación de la motocicleta. En

cambio, hay un incremento de accidentes el sábado y domingo acumulando el 38.7%; este comportamiento es similar al que presentan los vehículos automotores en la RCF; en promedio ocurren 138 accidentes diarios, siendo el martes el de menor registro con 88 y el domingo el de mayor con 189. Respecto a la distribución de los accidentes con víctimas y saldos por hora del día, se obtuvo que dentro del rango de las 16 a las 22 horas se presenta el mayor número de accidentes con víctimas (lesionados y muertos) acumulando 347 accidentes, 390 lesionados y 88 muertos representando el 38.9, 41.4 y 40.2% del total, respectivamente. No obstante que los accidentes ocurren mayormente de día (57%), la severidad (en cuanto a la mortalidad) de los impactos a motociclistas durante la noche aumenta. De día 101 muertos y 507 accidentes (0.20 muertos por accidente) y por la noche la relación aumenta a 0.31.

Los tipos de vehículos implicados en accidentes con víctimas de motocicletas son los vehículos sedán y pick-up con el 62.3%, los vehículos de carga con el 14.8% y para el 17.4% no se tiene información debido a que el vehículo se retiró del lugar del accidente.

La distribución de la edad de los motociclistas implicados en accidentes refleja que el mayor rango es de 20 a 24 años con 18.3%, seguido por 25-29 y 30-34 años con 14.8 y 12.7%, respectivamente. Cabe mencionar que del total de accidentes, para el 15.6% no se cuenta con información de la edad del conductor de la motocicleta. La edad media de los motociclistas implicados en las colisiones es de treinta y dos años; sin embargo, los jóvenes son los que participan mayoritariamente en colisiones con motocicleta. Respecto al sexo, el 94.5% son hombres, 2.5% son mujeres y del porcentaje restante (3%) no se cuenta con información.

Al combinar los accidentes y el alineamiento se observa que el 81.8% de los casos se producen en una sección en tangente, 9.3% en curva abierta y 8.4% en curva cerrada. La distribución de las víctimas obedece a un comportamiento muy similar. Adicionalmente, la distribución de los saldos en función del tipo de carretera (número de carriles y con o sin acotamiento) muestra que el 32.1% de los percances con víctimas ocurren en carreteras de dos carriles con acotamiento, el 29% en carreteras de cuatro o más carriles y 14.2% en dos carriles sin acotamiento; para una cuarta parte del total de accidentes con víctimas se carece de información del tipo de carretera y número de carriles.

En el análisis de los escenarios de accidentes con participación de la motocicleta se obtuvo que en carreteras de dos carriles sin acotamientos ocurre el 42.0%, en vías de cuatro carriles el 39.4% y el 18.6% restante en carreteras de dos carriles con acotamientos. En el caso de accidentes unitarios (237 siniestros) predominaron los derrapes o patinazos de la motocicleta seguido por tres escenarios diferentes: salida del camino (40.1%), permaneciendo en la superficie de rodamiento (31.2%) e impacto contra objeto fijo (23.6%); cabe mencionar que 4.6% se debió a impactos contra semoviente.

Existen tres situaciones de conflicto más frecuentes que acumulan el 80.8% de las colisiones contra un vehículo automotor y que el motociclista es el responsable, éstas son: el choque por alcance (28.7%), el cruce intempestivo de la motocicleta (27.1%) y el choque frontal (25.0%); en segundo orden de importancia se tienen los giros de vuelta izquierda con el 10.7%. Ahora bien, en el caso de que el motociclista sea involucrado las situaciones de conflicto son dos: el choque por alcance (29.5%) y la maniobra de vuelta izquierda (25%); en segundo orden están el cruce del vehículo con el 17.5% y el choque frontal con el 14.8%; estos cuatro escenarios suman el 86.8%.

Las colisiones entre motocicleta y vehículo automotor están relacionadas con las siguientes infracciones: no ceder el paso (24.3%), la velocidad inmoderada (19.1%), la invasión del carril contrario (14.0%), no guardar la distancia (9.1%) y la mala ejecución de vuelta izquierda (7.9%); en segundo orden de importancia están los cambios intempestivos de carril, rebases indebidos y no respetar el señalamiento. En el caso de los accidentes unitarios es común encontrar en los Hechos de tránsito a la velocidad inmoderada como la causa principal atribuible al percance.

Un estudio Español, a partir de la base de datos de accidentes de tránsito con víctimas estableció una caracterización de los impactos de motocicletas contra un objeto fijo o salida del camino, debido a la severidad ocasionada por la velocidad que desarrollan este tipo de vehículos; resultando que las extremidades inferiores, seguidas por las extremidades superiores son las zonas del cuerpo más proclives a sufrir lesiones (DGT y UV, 2007).

Las barreras de contención suponen un peligro, ya que ocasionan serios daños en la columna vertebral y extremidades inferiores, así como en la cabeza, en caso de colisión. Por las características de la información contenida en los registros de la PF no fue posible determinar las partes del cuerpo que resultan lesionadas.

5. ACCIONES PARA PROTEGER AL UV

5.1 Normativa

Es común observar que la planeación de la circulación vial está enfocada en facilitar el tránsito automotor sin incluir al UV, ocasionándole un incremento de riesgo vial. En carreteras federales se cuenta con el Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal, el cual establece derechos y obligaciones a los conductores de bicicletas, triciclos, motocicletas, trimotor o cuatrimotor que son congruentes con la naturaleza de los vehículos que conduzcan, así como de los peatones (DOF, 2012). Además, el reglamento menciona las disposiciones de control de tránsito para la circulación del UV, a través del señalamiento horizontal y vertical, y otros dispositivos como isletas y semáforos, así como en intersecciones a nivel, ciclovías y pasos peatonales, de acuerdo a lo recomendado por la normativa de la SCT (DOF, 2011).

5.2 Infraestructura

Los expertos afirman que dentro de las erróneas políticas de planeación regional y urbana, los interminables asentamientos lineales sin banquetas al lado de los caminos pueden ser el desastre más crucial para la seguridad vial en los países en desarrollo. Éstos están ocasionando un número considerable de accidentes con víctimas, sobre todo al UV (Vollpracht, 2011).

El enfoque de sistema para carreteras más seguras pretende: a) evitar las erróneas políticas de diseño que no se ajustan a las necesidades del UV, b) impedir el acceso no controlado a propiedades a lo largo de la carretera (impedir el comercio irregular), c) controlar la velocidad de operación de los vehículos automotores, y d) reducir la velocidad mediante reductores con su debido señalamiento preventivo y restrictivo, principalmente en la aproximación a zonas urbanas (ONU, 2010).

5.3 Industria automotriz

Los sistemas denominados “seguridad pasiva” ajeno al vehículo son todos aquellos sistemas que tienden a reducir las consecuencias de un impacto vial de un vehículo contra un UV. Estos sistemas se activan, de forma inmediata en caso de un posible atropellamiento, con o sin la intervención del conductor que se ve involucrado en la colisión. Dentro de los sistemas de protección para el peatón, en los vehículos Volvo se está instalando un dispositivo de seguridad, los “airbags” para peatones y un dispositivo de frenado automático. El sistema al detectar el impacto activa la bolsa de aire en milésimas de segundo saliendo de la parte posterior del cofre cubriendo poco más de un tercio del parabrisas, para amortiguar el impacto y evitar traumatismos de cráneo al UV al momento de golpear contra el parabrisas delantero, entre otras lesiones (Volvo, 2012). Sin lugar a dudas un punto importante a resolver en la industria automotriz es la armonización de los requisitos técnicos para homologar a los vehículos de motor que se fabrican en América Latina en materia de protección al UV; lo anterior para evitar que las armadoras adopten disposiciones que difieran entre ellas. Tal es el caso de los vehículos económicos que se ofertan en América Latina con cero estrellas en seguridad (Latin NCAP, 2014).

5.4 Usuario vulnerable

Los elementos fundamentales para la seguridad vial relacionados con el UV son el promulgar y hacer cumplir la normativa sobre los factores que influyen en: a) la exposición al riesgo; planificación y uso de las vialidades según su función, convivencia del UV, b) el desarrollo de una colisión; exceso de velocidad, visibilidad inadecuada en los elementos de la vía, vicios en el diseño y mantenimiento de la vialidad, etc., c) la gravedad del impacto; falta de uso de los sistemas de retención, casco y protección insuficiente al peatón por parte del vehículo y, d) la gravedad de la lesión, retraso en localizar el siniestro, falta de atención pre-hospitalaria rápida y adecuada.

La experiencia internacional ha demostrado que una legislación en seguridad vial clara e

integral con sanciones apropiadas y campañas de sensibilización a la ciudadanía es un factor importante para minimizar las lesiones y las muertes ocasionadas por un siniestro vial (OMS, 2004). Además, el contar con una legislación puede no ser suficiente, si ésta no es integral ni se hace cumplir o que no cuente con los mecanismos institucionales y recursos para la aplicación coordinada de acciones.

6. CONCLUSIONES

Con este análisis exploratorio se obtuvo una visión general del perfil de la siniestralidad en las carreteras mexicanas, es decir el grado de severidad de las víctimas y tipo de participación del usuario vulnerable; así mismo se determinan las circunstancias, que prevalecen, p. ej. la temporalidad, ubicación y el grado de responsabilidad del UV.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con fondos de la Red Temática de Accidentes Viales (número 253411), como parte del programa de Redes Temáticas 2015 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

REFERENCIAS

- BARRERO, L. H., QUINTANA, L. A., SÁNCHEZ, A., FORERO, A., QUIROGA, J. Y CONSEJO NACIONAL DE POBLACIÓN, CONAPO. (2014). *Proyecciones de población del CONAPO 2010-2050*. NOM 035 SSA3 2012, SEGOB, Ciudad de México, México.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, DOF. (2011). *NOM-034-SCT2-2011, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y vialidades urbanas*. Ciudad de México, México.
- DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN, DOF. (2012). *Reglamento de Tránsito en Carreteras y Puentes de Jurisdicción Federal*. Poder Ejecutivo, Secretaría de Seguridad Pública, Ciudad de México, México.
- DIRECCIÓN GENERAL DE TRÁFICO Y UNIVERSIDAD DE VALENCIA, DGT y UV, (2007). *EMOVE: Estudio estadístico de los accidentes de motocicleta y las colisiones con turismo y otros vehículos*. PU_024280, España.
- FELKNOR, S., (2013). *Pedestrians' Beliefs about Road Crossing in Bogotá: Questionnaire Development*. Universitas Psychologica 12 (2): 433-444, Bogotá, Colombia.
- HIJAR M. (2012). *El camino peligroso del peatón: Los atropellamientos como problema de Salud Pública*. VCI-3, INSP, S Salud, Cuernavaca, Morelos. México.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA, INEGI. (2014). *Accidentes de tránsito en zonas urbanas y suburbanas 2013*. Aguascalientes, Ags., México.
- LATIN NCAP. (2014). *Programa de Evaluación de Autos Nuevos para América Latina y el Caribe*. Proyecto 2010-2013, Fase V Montevideo, Uruguay.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, OMS. (2004). *Informe sobre la salud en*

- el mundo. Cambiemos el rumbo de la historia*. ISBN 92 4 356265 7. Ginebra, Suiza.
- ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS, ONU. (2010). *Decade of Action for Road Safety 2011-2020*. Declaratoria de la Asamblea de la Organización de las Naciones Unidas, Washington DC, EE. UU.
- POLICÍA FEDERAL, PF. (2014). *Bases de datos de accidentes en carreteras federales 2011, 2012 y 2013*. Ciudad de México, México.
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES. (2014). *Anuario Estadístico Sector Comunicaciones y Transportes-2013*. Dirección General de Planeación. Ciudad de México, México.
- SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL DISTRITO FEDERAL, SMA-DF. (2011). *Manual del Ciclista urbano de la Ciudad de México*. Ciudad de México, México
- SECRETARIADO TÉCNICO DEL CONSEJO NACIONAL PARA LA PREVENCIÓN DE ACCIDENTES, ST-CONAPRA. (2014). *Informe sobre la situación de la Seguridad Vial, México 2014*. Secretaría de Salud, Ciudad de México, México.
- SISTEMA DE ADQUISICIÓN Y ADMINISTRACIÓN DE DATOS DE ACCIDENTES, SAADA. (2012). *Bases de datos de accidentes 2010*. Instituto Mexicano del Transporte. Querétaro, México.
- VOLLPRACHT H. (2011). *Linear settlements, vulnerable road users and the implications for urban land use and development in different countries*. XXIV° Congreso Mundial de Carreteras, AMC, Ciudad de México, México
- VOLVO, (2012). *Volvo's Pedestrian Airbag Technology and Pedestrian Detection*. European Motor News Volvo Car Group's, Volvo V40, Suecia.

62 Análise dos roubos de cargas no sul do Brasil

Mário José Pinheiro da Rocha

Letícia Dexheimer

Fernanda David Weber

Universidade Federal de Pelotas, Brasil

RESUMO

Este estudo está inserido no campo dos transportes terrestres, e trata dos roubos das cargas transportadas através do modal rodoviário no Brasil, mais especificamente no Estado do Rio Grande do Sul. Aborda a questão da segurança nas rodovias, somada às dificuldades que os órgãos de governo enfrentam em estudar melhor esse fenômeno, de modo a reduzi-lo. O crime em geral cresce a cada dia com maior velocidade em nosso país, seja por falta de recursos e investimentos em segurança pública, seja pela ineficiência das leis existentes ou falta de mecanismos punitivos mais eficientes que amenizem a sensação de impunidade por parte da população. Sendo assim, o estudo propõe apresentar um panorama dos roubos de cargas no RS, partindo-se de um método que propõe a contabilização, análise e, por fim, um diagnóstico dos roubos de cargas.

Palavras-chave: roubo de carga, transporte de carga, análise criminal.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, em torno de 80% do PIB do Brasil circula sob a malha rodoviária brasileira, entendendo-se assim que o modal rodoviário exerce grande influência na economia nacional. Contudo, as empresas de transporte investem em torno de 15% do seu custo operacional com apólice de seguros, empresas de gerenciamento risco, equipamentos de rastreamento veicular, escolta armada e segurança patrimonial (SINDSEG, 2014). Este cenário dá-se aos elevados índices de sinistralidade decorrentes de vários fatores que acabam culminando em impactos financeiros negativos nas operações de transportes. Importantes decisões relativas ao gerenciamento da logística envolvem a segurança das cargas movimentadas pelas rodovias do país, uma vez que os roubos de cargas estão se tornando mais frequentes, causando prejuízos às empresas e, conseqüentemente, à economia como um todo.

Em um panorama nacional, observa-se que as regiões Sudeste, Nordeste e Sul possuem as malhas rodoviárias mais densas e, portanto, são as regiões mais afetadas por roubos das cargas. A região Sudeste se destaca das demais. Os estados do Rio de Janeiro e São Paulo juntos concentram 75.85% dos registros de ocorrências de roubos de cargas ocorridos no país. A região Nordeste vem em seguida, com 8.39%, e o Rio Grande do Sul, com 6.75%, ocupando a terceira posição no percentual de ocorrências. No panorama estadual, o órgão

responsável pelos registros de roubos é a Secretaria de Segurança Pública (SSP). Este considera que o roubo ocorre ao motorista do veículo, e não somente à carga. Assim, os pertences dos motoristas são considerados carga roubada, juntamente com o carregamento no interior do veículo. Esta interpretação acaba por afetar os dados no que diz respeito ao fabricante e ao transportador, quanto às decisões que dizem respeito à segurança da carga especificamente.

Visando apresentar uma análise dos roubos de cargas no RS e auxiliar os órgãos gestores na tomada de decisões estratégicas, no intuito de mitigar a incidência dos roubos, foi elaborada uma análise sob uma nova ótica de quantificação das ocorrências. O objetivo principal do trabalho foi a aplicação de um método que viabilize a contabilização dos roubos de cargas. Além disso, visa também proporcionar uma visão mais clara do perfil das cargas roubadas no Estado, baseado principalmente na Análise Criminal. O recorte temporal da pesquisa foi de 01 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2014.

2. PANORAMA NACIONAL DOS ROUBOS DE CARGAS

As regiões Sudeste, Nordeste e Sul são as mais densas em termos de rodovias. Como consequência, são as mais afetadas pelo roubo de carga transportada em sua malha rodoviária. De acordo com a Figura 3, essas regiões ocupam os 1º, 2º e 3º lugares, respectivamente, quando se trata de registros de ocorrências.

Os prejuízos causados pelos roubos e furtos de carga no país têm sido crescentes. No período de 1999 a 2005, acumulou-se um crescimento de 66.7%, e alcançou-se a cifra de R\$ 700 milhões em mercadorias roubadas. É interessante ressaltar que o maior número de roubos e furtos (82.6%), e a maior parte dos prejuízos (76.7%), concentram-se na região Sudeste, a mais desenvolvida e com maior movimentação de cargas, como mostra a Tabela 1. Esse número de ocorrências se reflete em custos de seguro e gerenciamento de risco, e podem influenciar as rotas traçadas, alongando distâncias e diminuindo a produtividade do setor. É preciso um esforço expressivo e integrado das polícias, com fluxo de informação e serviço de inteligência, para prevenir os roubos de carga no Brasil.

Tabela 1. Roubo de cargas no Brasil 2013

| Região | Nº de Ocorrências | | Valores (em milhões) | |
|---------------|--------------------------|-------------|-----------------------------|-------------|
| Norte | 249 | 1.7% | 10.60 | 1.0% |
| Nordeste | 1,272 | 8.5% | 60.68 | 5.9% |
| Centro-Oeste | 293 | 2.0% | 30.24 | 2.9% |
| Sudeste | 12,317 | 82.6% | 789.99 | 76.7% |
| Sul | 1,022 | 6.9% | 138.28 | 13.4% |
| Total | 14,904 | 100% | 1,029.87 | 100% |

Fonte: NTC, 2014



Figura 3. Distribuição dos roubos de cargas no Brasil

Fonte: NTC (2014)

Somado aos problemas de falta de infraestrutura rodoviária e outros, a frequente ocorrência de desaparecimento de cargas, seja nas estradas, seja no meio urbano, vem afetando consideravelmente o desempenho do setor. As cargas no RS, a exemplo do país, também são transportadas, em sua maioria, através do modal rodoviário. O Estado possui, atualmente, 19,983.23 km de extensão de Rodovias Estaduais e Federais (DAER, 2014). Sendo assim, o sistema de transporte rodoviário desempenha um papel relevante na integração da cadeia de suprimentos, onde importantes decisões relativas ao gerenciamento da logística envolvem a segurança das cargas movimentadas (CNT, 2007).

Além das mercadorias serem transportadas por rodovias, grande parte do tempo trafega em vias rurais ou urbanas, aumentando ainda mais sua exposição a ações delituosas de quadrilhas especializadas neste tipo de roubo. Os dados da SSP/RS não representam o real cenário em que se encontra o roubo de cargas no Estado. Isso porque o sistema informatizado de registros de ocorrências ou forma de extração de dados gerados por estes é precário.

3. FUNDAMENTAÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente, as Instituições de Segurança do RS responsáveis pelo registro das ocorrências de roubos não mantêm um sistema de padronização na inserção do dado primário. Isto acarreta em um banco de dados carente e distorcido das informações. Tais informações são fundamentais ao suporte na tomada de decisões dos gestores de políticas públicas de segurança.

Um dos principais problemas em utilizar dados de roubos de carga oriundos de bancos de dados das SSP dos Estados para análise é o fato destes não expressarem a realidade das estradas. A falta de padronização dos dados coletados provenientes de Sistemas Informatizados Policiais (SIP) é um dos fatores que mais geram distorções nas análises. Para determinar um panorama estadual, verificou-se parte de um estudo da SSP/RS, com base nos dados do SIP/PROCERGS (2014), mesmo sistema em que foram extraídos os dados para o

presente estudo. No estudo da SSP/RS, foram consideradas somente ocorrências de roubo a motorista de caminhão. Porém, nos registros são encontrados, por exemplo, roubos a cargas de cigarro tanto como roubo a motorista de caminhão, como a motorista de entregas. Ou seja, alocações distintas para o mesmo tipo de roubo. O fato da carga em questão (cigarro) ter sido o 5º mais roubado no primeiro semestre de 2014, como indica a Tabela 2, foi um dos fatores que motivaram a realização deste trabalho. Isso porque não se pode classificar documentações, valores, pertences do próprio motorista dos veículos como sendo roubo de carga.

4. MÉTODO DE TRABALHO

O método utilizado foi o dedutivo, onde os registros policiais nos quais a carga tenha sido roubada total ou parcialmente. Os dados foram coletados a partir do SIP, banco de dados das informações referentes a ocorrências policiais. Foram analisados todos os registros no período de 2013 e 2014, dos quais foram excluídos, manualmente, os registros identificados por roubo a motorista de entregas e roubo a motorista de carga de caminhões. Dentre os registros remanescentes, foram selecionados e considerados no estudo aqueles em se confirmou o roubo da carga total ou parcialmente. Foram desconsiderados os registros referentes a roubo dos pertences ou valores em dinheiro do motorista ou ajudante, e até mesmo valores referentes a cargas.

Tabela 2. Roubo de Cargas no RS: 1º semestre de 2014

| Tipo de Carga | Total | |
|--|--------------|-------------|
| Documentação/Dinheiro/Celular da empresa | 20 | 26% |
| Pertences do motorista | 15 | 19% |
| Outros Estados | 12 | 16% |
| Produtos diversos | 9 | 12% |
| Carga de cigarros | 6 | 8% |
| Produtos alimentícios | 4 | 5% |
| Fumo | 2 | 3% |
| Eletrodomésticos/Eletrônicos/Informática | 2 | 3% |
| Equipamento do caminhão | 1 | 1% |
| Carga de soja | 1 | 1% |
| Carga de carne | 1 | 1% |
| Não informada | 1 | 1% |
| Carga de medicamentos | 1 | 1% |
| Carga de polietileno | 1 | 1% |
| Não informada | 1 | 1% |
| Total | 77 | 100% |

Fonte: BRASIL, 2014

O estudo utilizou dados extraídos do SIP e foi dividido em quatro etapas: coleta, quantificação, seleção e análise dos dados. Portanto, trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa. Na fase da coleta foram extraídos os números absolutos de roubos a motorista de cargas de caminhões registrados para o período estudado. O mesmo foi realizado nas ocorrências de roubos a motorista de entregas. No passo seguinte, foi criado um banco de dados contendo os dois tipos de ocorrências policiais. O período estudado foi de 01 de janeiro de 2013 a 31 de dezembro de 2014. O recorte espacial é o território do Estado do Rio Grande do Sul.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados dos dados coletados nos bancos de dados da SIP/PROCERGS (2014) referente aos roubos de carga aos motoristas de caminhão e de entregas. Também apresenta ao procedimento utilizado para selecionar os dados utilizados no estudo. A análise dos dados selecionados também é apresentada.

5.1 Coleta de dados

A coleta dos dados se deu com base em todos os registros de ocorrências de roubos a motorista de carga de caminhão, e está apresentada na

Tabela 3. Os dados de roubo a motorista de entregas também foram considerados, e podem ser visualizados na Tabela 4.

De acordo com a

Tabela 3, pode-se verificar que houve uma redução de 13.1%, em 2014, nos roubos de carga a motoristas de caminhões. Os meses em que os roubos foram mais expressivos foram Outubro (75.0%), Julho (63.6%) e Abril (26.7%), respectivamente. Já os meses de Fevereiro (-45.5%), Janeiro (42.9%) e Março (-35.3%) foram os meses em que houve as maiores reduções nos roubos aos motoristas de caminhões.

Na Tabela 4 pode-se verificar que, em 2014, houve um aumento anual de 10% nos roubos a motoristas de entregas. Os meses de Setembro (19.0%), Dezembro (16.7%), Outubro (13.6%) e Novembro (-6.6%) foram os que tiveram redução na incidência de roubo aos motoristas de entregas. Todos os demais meses tiveram aumento nos roubos, sendo os meses de Janeiro (146.4%), Maio (143.5%) e Fevereiro (132.7%) os mais prejudiciais financeiramente para o setor.

5.2 Seleção dos registros a serem analisados

A etapa de seleção dos registros a serem utilizados no estudo resultou nos totais mensais apresentados na Tabela 5. A seleção ocorreu manualmente, sendo realizada a leitura de todos os históricos das ocorrências minuciosamente, e selecionando somente aqueles que se

enquadraram no objetivo do estudo. Ou seja, apresentaram roubos totais ou parciais de cargas.

Tabela 3. Ocorrências de roubos a motorista de carga de caminhão: dados totais

| Mês | 2013 | 2014 | Relação 2014/2013 |
|--------------|-------------|-------------|--------------------------|
| Janeiro | 21 | 12 | -42.9% |
| Fevereiro | 11 | 6 | -45.5% |
| Março | 17 | 11 | -35.3% |
| Abril | 15 | 19 | 26.7% |
| Maió | 20 | 17 | -15.0% |
| Junho | 17 | 13 | -23.5% |
| Julho | 11 | 18 | 63.6% |
| Agosto | 12 | 10 | -16.7% |
| Setembro | 16 | 11 | -31.3% |
| Outubro | 12 | 21 | 75.0% |
| Novembro | 16 | 13 | -18.8% |
| Dezembro | 23 | 15 | -34.8% |
| Total | 191 | 166 | -13.1% |

Fonte: SIP/PROCERGS, 2014. Dados atualizados até 31/12/14

Tabela 4. Ocorrências de roubos a motorista de entregas: dados totais

| Meses | 2013 | 2014 | Relação 2014/2013 |
|--------------|-------------|-------------|--------------------------|
| Janeiro | 56 | 82 | 46.4% |
| Fevereiro | 49 | 65 | 32.7% |
| Março | 58 | 67 | 15.5% |
| Abril | 50 | 59 | 18.0% |
| Maió | 46 | 66 | 43.5% |
| Junho | 66 | 63 | -4.5% |
| Julho | 51 | 61 | 19.6% |
| Agosto | 52 | 66 | 26.9% |
| Setembro | 63 | 51 | -19.0% |
| Outubro | 66 | 57 | -13.6% |
| Novembro | 61 | 57 | -6.6% |
| Dezembro | 54 | 45 | -16.7% |
| Total | 672 | 739 | 10.0% |

Fonte: SIP/PROCERGS, 2014. Dados atualizados até 31/12/14

Tabela 5. Quantidade mensal de roubos de carga no RS

| Meses | Totais absolutos | | Relação 2014/2013 |
|--------------|------------------|------------|----------------------|
| | 2013 | 2014 | |
| Janeiro | 31 | 21 | -32,3% |
| Fevereiro | 23 | 18 | -21,7% |
| Março | 29 | 13 | -55,2% |
| Abril | 23 | 18 | -21,7% |
| Maió | 26 | 22 | -15,4% |
| Junho | 23 | 29 | 26,1% |
| Julho | 19 | 38 | 100,0% |
| Agosto | 20 | 25 | 25,0% |
| Setembro | 24 | 30 | 25,0% |
| Outubro | 24 | 18 | -25,0% |
| Novembro | 19 | 31 | 63,2% |
| Dezembro | 25 | 19 | -24,0% |
| Total | 286 | 282 | -1,4% |

5.3 Análise dos registros finais

É possível visualizar na Tabela 5 que, em 2014, houve uma redução na incidência de roubos de carga de 1.4%. Os meses em que ocorreram mais roubos foram julho, com um aumento de 100%, e novembro, com um aumento de 63.2%. Em novembro, o mercado está sendo abastecido com mercadorias para atender o aumento da demanda originada pelas festas natalinas. Este pode ser uma das causas de ser um dos meses mais visados pelos contraventores. Já no mês de julho para o referido ano (2014) pode ser um dado atípico. Isso porque, neste período, no Brasil, estava ocorrendo a Copa do Mundo, que movimentou todos os setores da economia, aumento à circulação de mercadorias para atender a demanda especial. Com relação à redução dos roubos, os meses mais lucrativos para a Segurança Pública foram Março (-55.2%) e janeiro (32.3%).

5.3.1 Incidência de roubos por modalidade

Foram considerados para fins deste estudo tanto os registros de roubos consumados, como os roubos não consumados. Roubos consumados são aqueles em que o ladrão consegue levar a carga. Já os roubos não consumados são aqueles em que, por motivos alheios a vontade do autor do delito, o crime não se concretiza e a carga não é levada. A Tabela 6 apresenta o quantitativo em relação aos roubos por modalidade.

Tabela 6. Quantidade de roubos a carga por modalidade de roubo

| Modalidade do roubo | Total | | | | Relação 2014/2013 |
|---------------------|------------|---------------|------------|---------------|----------------------|
| | 2013 | | 2014 | | |
| Consumados | 263 | 91.96% | 266 | 94.33% | 1.14% |
| Não consumados | 23 | 8.04% | 16 | 5.67% | -30.43% |
| Total | 286 | 100.0% | 282 | 100.0% | -1.40% |

Tabela 7. Quantidade de ocorrências de roubos de carga por dia da semana

| Dia da Semana | 2013 | 2014 | Relação 2014/2013 |
|---------------|------------|------------|-------------------|
| Segunda | 57 | 53 | -7,02% |
| Terça | 47 | 52 | 10,64% |
| Quarta | 48 | 71 | 47,92% |
| Quinta | 58 | 51 | -12,07% |
| Sexta | 46 | 47 | 2,17% |
| Sábado | 23 | 7 | -69,57% |
| Domingo | 7 | 1 | -85,71% |
| Total | 286 | 282 | -1,40% |

Os roubos consumados ocorridos em 2013 representaram 91.96% do total de roubos do período. Já os roubos não consumados foram de 8.04%. Em 2014, os crimes consumados representam 94.33% do total, enquanto os não consumados representam apenas 5.67% do total anual. Ao analisar a relação 2014/2013, nota-se que houve uma redução anual de 1.4%. No comparativo, os roubos consumados tiveram um aumento de 1.14%. Mas foram os roubos não consumados que realmente influenciaram a análise anual: uma redução de 30.43%.

5.3.2 Incidência de roubos por dia da semana

Quando se analisa detalhadamente os dados de roubos de carga com relação aos dias da semana, verifica-se que o dia em que ocorrem mais incidentes é às quartas-feiras, conforme mostra a Tabela 7. Os dados mostram que houve um aumento de 47.92%. Aos finais de semana, a redução chegou a 73.33%, sendo que a redução aos sábados foi de 69.57% e aos domingos, de 85.71%.

Na Figura 4 pode ser visto a taxa de roubos por dia da semana para o período estudado. Ao analisar os dados, verifica-se que os roubos às quartas-feiras, em 2015, representaram 25.2% do total anual de roubos de carga. Em 2013, os dias mais visados pelos contraventores foram quintas-feiras (20.3%) e segundas-feiras (19.9%). Nestes dias em questão foram os que

tiveram a maior redução de incidências de roubos quando comparado a 2014, conforme os dados da Tabela 7.

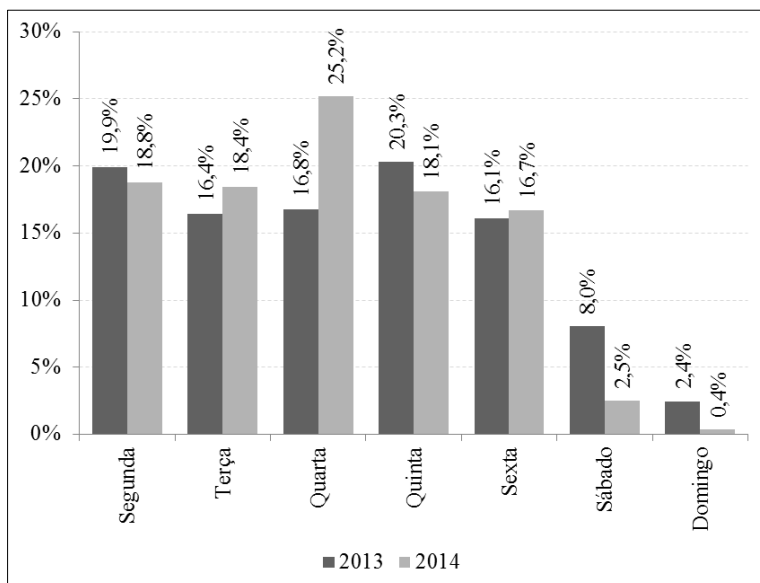


Figura 4. Roubos de cargas no RS por dia da semana

5.3.3 Incidência de roubos por faixa horária

De acordo com a Tabela 8, verifica-se que a faixa horária em que mais ocorreram roubos de carga foi entre 07h 00min e 09h 00min, para 2013, enquanto em 2014, a faixa horária mais afetada pelos roubos foi entre 08h 00min e 10h 00min. Ao analisar a variação anual, nota-se que houve um aumento significativo nas ocorrências entre 08h 00min e 10h 00min, atingindo a magnitude de 94.11%.

5.3.4 Incidência de roubos por município

Para esta análise, foram selecionados os municípios com maior representatividade de roubos no Estado, para o período analisado, totalizando 17 municípios. Porto Alegre, a capital do Estado, concentrou o maior número dos roubos de cargas, 21.9% em 2013 e 29.7% em 2014. Além disso, apresentou um aumento anual de 8.6%, conforme mostra a Tabela 9.

O município de Caxias do Sul, principal município da serra gaúcha, também apresentou valores significativos, com um aumento de 20% no comparativo anual. Mas foi no município de Esteio que se registrou o maior aumento anual, 200%. Já em relação à sua representatividade na totalidade, não demonstrou destaque. O município de Santa Cruz do Sul, grande produtor de fumo, matéria-prima do cigarro, um aumento de 66.7% no comparativo anual. Santa Maria, município onde se registra o maior contingente militar do interior do Estado, registrou um aumento igual ao de Santa Cruz do Sul, 66.7%.

Dentre os municípios que tiveram redução no comparativo anual, os destaques são Canoas, Camaquã e Sapucaia do Sul, na região metropolitana da capital; Osório, que fica às margens

da BR101, rodovia Federal e responsável pela maior parte do escoamento de mercadorias do estado para o resto do país; e Pelotas, localizado ao sul do Estado e ponto importante na malha rodoviária federal, por onde escoam a produção gaúcha para o Mercosul. Estes municípios representam uma redução de 72%, sendo que em Canoas a redução foi de 60.9%, Camaquã foi de 66.7%, Sapucaia do Sul, de 83.3%, Osório, com uma queda de 75.0%, e Pelotas, com a maior queda, 87.5%.

Tabela 8. Número de roubos de carga por faixa horária no RS

| Faixa horária | 2013 | | 2014 | | Relação 2014/2013 |
|----------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|--------------------------|
| Das 00h às 00h 59min | 2 | 0.7% | 2 | 0.7% | 0.0% |
| Das 01h às 01h 59min | 3 | 1.0% | 2 | 0.7% | -33.3% |
| Das 02h às 02h 59min | 6 | 2.1% | 4 | 1.4% | -33.3% |
| Das 03h às 03h 59min | 1 | 0.3% | 4 | 1.4% | 300.0% |
| Das 04h às 04h 59min | 2 | 0.7% | 3 | 1.1% | 50.0% |
| Das 05h às 05h 59min | 8 | 2.8% | 7 | 2.5% | -12.5% |
| Das 06h às 06h 59min | 16 | 5.6% | 3 | 1.1% | -81.3% |
| Das 07h às 07h 59min | 41 | 14.3% | 34 | 12.1% | -17.1% |
| Das 08h às 08h 59min | 38 | 13.3% | 76 | 27.0% | 100.0% |
| Das 09h às 09h 59min | 30 | 10.5% | 56 | 19.9% | 86.7% |
| Das 10h às 10h 59min | 16 | 5.6% | 23 | 8.2% | 43.8% |
| Das 11h às 11h 59min | 29 | 10.1% | 18 | 6.4% | -37.9% |
| Das 12h às 12h 59min | 16 | 5.6% | 9 | 3.2% | -43.8% |
| Das 13h às 13h 59min | 11 | 3.8% | 5 | 1.8% | -54.5% |
| Das 14h às 14h 59min | 10 | 3.5% | 5 | 1.8% | -50.0% |
| Das 15h às 15h 59min | 13 | 4.5% | 6 | 2.1% | -53.8% |
| Das 16h às 16h 59min | 9 | 3.1% | 6 | 2.1% | -33.3% |
| Das 17h às 17h 59min | 5 | 1.7% | 3 | 1.1% | -40.0% |
| Das 18h às 18h 59min | 2 | 0.7% | 1 | 0.4% | -50.0% |
| Das 19h às 19h 59min | 5 | 1.7% | 3 | 1.1% | -40.0% |
| Das 20h às 20h 59min | 4 | 1.4% | 3 | 1.1% | -25.0% |
| Das 21h às 21h 59min | 10 | 3.5% | 4 | 1.4% | -60.0% |
| Das 22h às 22h 59min | 5 | 1.7% | 5 | 1.8% | 0.0% |
| Das 23h às 23h 59min | 4 | 1.4% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Total | 286 | 100.0% | 282 | 100.0% | -1.4% |

Tabela 9. Total de incidências de roubo de carga por município no RS

| Município | 2013 | | 2014 | | Relação 2014/2013 |
|-------------------|-------------|---------------|-------------|---------------|--------------------------|
| Alvorada | 9 | 5.6% | 7 | 5.5% | -22.2% |
| Cachoeirinha | 6 | 3.8% | 5 | 3.9% | -16.7% |
| Camaquã | 6 | 3.8% | 2 | 1.6% | -66.7% |
| Canoas | 23 | 14.4% | 9 | 7.0% | -60.9% |
| Caxias do Sul | 15 | 9.4% | 18 | 14.1% | 20.0% |
| Esteio | 2 | 1.3% | 6 | 4.7% | 200.0% |
| Gravataí | 8 | 5.0% | 6 | 4.7% | -25.0% |
| Montenegro | 5 | 3.1% | 6 | 4.7% | 20.0% |
| Novo Hamburgo | 9 | 5.6% | 8 | 6.3% | -11.1% |
| Osório | 8 | 5.0% | 2 | 1.6% | -75.0% |
| Pelotas | 8 | 5.0% | 1 | 0.8% | -87.5% |
| Porto Alegre | 35 | 21.9% | 38 | 29.7% | 8.6% |
| Santa Cruz do Sul | 3 | 1.9% | 5 | 3.9% | 66.7% |
| Santa Maria | 3 | 1.9% | 5 | 3.9% | 66.7% |
| São Leopoldo | 8 | 5.0% | 6 | 4.7% | -25.0% |
| Sapucaia do Sul | 6 | 3.8% | 1 | 0.8% | -83.3% |
| Viamão | 6 | 3.8% | 3 | 2.3% | -50.0% |
| Total | 160 | 100.0% | 128 | 100.0% | -20.0% |

5.3.5 Incidência de roubos por rodovia federal

Com relação às Rodovias Federais, dentre as que apresentaram maior incidência estão as BRs 386, 290, 116, 285, 158, 392. Destacam-se as rodovias, BR 158 e BR 290, com 300,0% e 15,00% de aumento no comparativo anual, respectivamente. As BRs 392 e 116 tiveram com redução de 83,3% e 45,0% cada, enquanto a BR 386, por sua vez, foi a rodovia mais visada quanto aos roubos de carga em termos de números absolutos, conforme mostra a Tabela 10.

A BR 116, apresentada na Figura 5, é uma das principais rodovias do RS, e a principal rodovia brasileira, sendo também a maior rodovia totalmente pavimentada do país. É uma rodovia longitudinal que tem início na cidade de Fortaleza, no Ceará, região nordeste, e término em Jaguarão, no sul do RS, fronteira com o Uruguai. Sua extensão total é de aproximadamente 4.380 km, passando por dez estados brasileiros. No RS, seu trecho é de aproximadamente 525 km, indo desde Jaguarão a Vacaria, na região Serrana, divisa com o estado de Santa Catarina. Esta rodovia ainda liga cidades importantes do estado, como Pelotas, Porto Alegre, Canoas e Caxias do Sul.

Tabela 10. Total de incidências de roubos de carga por rodovia federal no RS

| Rodovias Federais | 2013 | | 2014 | | Relação 2014/2013 |
|-------------------|------------|---------------|------------|---------------|-------------------|
| | Quantidade | Porcentagem | Quantidade | Porcentagem | |
| BR 386 | 14 | 28.0% | 16 | 33.3% | 14.3% |
| BR 290 | 4 | 8.0% | 10 | 20.8% | 150.0% |
| BR 116 | 20 | 40.0% | 11 | 22.9% | -45.0% |
| BR 285 | 5 | 10.0% | 6 | 12.5% | 20.0% |
| BR 158 | 1 | 2.0% | 4 | 8.3% | 300.0% |
| BR 392 | 6 | 12.0% | 1 | 2.1% | -83.3% |
| Total | 50 | 100.0% | 48 | 100.0% | -4.0% |

**Figura 5. Extensão da Rodovia Federal BR116**

5.3.6 Incidência de roubos por rodovia estadual

Dentre as Rodovias Estaduais, a que mais se destacou em aumento de roubos de cargas foi a RS 122, com 66.7%. Esta rodovia estadual liga a capital aos municípios de São Sebastião do Caí, no Vale do Rio dos Sinos, e Caxias do Sul e Antônio Prado, na Serra. Os dados de roubo de carga nas rodovias estaduais podem ser visualizados na Tabela 11.

A rodovia estadual que se destacou pela redução de roubos de carga, e é uma rodovia importante na circulação de mercadorias na região metropolitana, foi a RS118. Em 2013, essa rodovia representou 13.3% do total de roubos anuais em rodovias estaduais; e em 2014, somente 6.7% do total nestas rodovias.

5.3.7 Incidência por tipo de carga roubada

Com o percentual de 74.5% do total de roubos, as cargas de cigarros lideram o ranking das mais roubadas no Estado em 2014, conforme mostra a Tabela 12. Em 2013, este tipo de carga representou 55.9% do total roubado no estado. O aumento anual dos roubos de cigarros foi de 31.3%.

Já os roubos a cargas de polietileno, apesar de ocorrerem em menor número, atingiu um aumento anual de 250%. Além dos produtos citados, também são visadas as cargas de eletroeletrônicos, com uma redução de 27.3%; alimentos, que teve uma queda de 57.1%; medicamentos, que teve um aumento de 33.3%; e fumo, também com um aumento de 33.3%. Esse último corrobora com o aumento de roubos ocorridos em Santa Cruz do Sul, principal produtor de fumo.

Tabela 11. Incidências de roubos de carga por Rodovia Estadual no RS

| Rodovias estaduais | 2013 | | 2014 | | Relação 2014/2013 |
|--------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|-------------------|
| | | | | | |
| RS 122 | 3 | 10.0% | 5 | 16.7% | 66.7% |
| RS 471 | 0 | 0.0% | 4 | 13.3% | - |
| RS 481 | 0 | 0.0% | 3 | 10.0% | - |
| RS 453 | 2 | 6.7% | 2 | 6.7% | 0.0% |
| RS 472 | 0 | 0.0% | 2 | 6.7% | - |
| RS 020 | 0 | 0.0% | 2 | 6.7% | - |
| RS 470 | 2 | 6.7% | 2 | 6.7% | 0.0% |
| RS 482 | 0 | 0.0% | 2 | 6.7% | - |
| RS 235 | 0 | 0.0% | 2 | 6.7% | - |
| RS 118 | 4 | 13.3% | 2 | 6.7% | -50.0% |
| RS 239 | 3 | 10.0% | 2 | 6.7% | -33.3% |
| RS 344 | 0 | 0.0% | 2 | 6.7% | - |
| RS 129 | 2 | 6.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| RS 240 | 2 | 6.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| RS 135 | 3 | 10.0% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| RS 158 | 3 | 10.0% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| RS 332 | 2 | 6.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| RS 446 | 2 | 6.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| RS 287 | 2 | 6.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Total | 30 | 100.0% | 30 | 100.0% | 0.0% |

Tabela 12. Incidência por carga roubada no RS

| Carga | 2013 | | 2014 | | 2014/2013 |
|---|------------|---------------|------------|---------------|--------------|
| | | | | | |
| Cigarro | 160 | 55.9% | 210 | 74.5% | 31.3% |
| Eletrônicos e eletroeletrônicos | 22 | 7.7% | 16 | 5.7% | -27.3% |
| Medicamentos | 6 | 2.1% | 8 | 2.8% | 33.3% |
| Fumo | 6 | 2.1% | 8 | 2.8% | 33.3% |
| Polietileno | 2 | 0.7% | 7 | 2.5% | 250.0% |
| Alimentos | 14 | 4.9% | 6 | 2.1% | -57.1% |
| Carne | 0 | 0.0% | 5 | 1.8% | - |
| Roupas e calçados | 4 | 1.4% | 4 | 1.4% | 0.0% |
| Não informado | 14 | 4.9% | 4 | 1.4% | -71.4% |
| Gás – GLP | 4 | 1.4% | 4 | 1.4% | 0.0% |
| Grãos | 2 | 0.7% | 3 | 1.1% | 50.0% |
| Diversos | 13 | 4.5% | 2 | 0.7% | -84.6% |
| Cosméticos, perfumaria, produtos de higiene e limpeza | 4 | 1.4% | 2 | 0.7% | -50.0% |
| Bebidas | 9 | 3.1% | 1 | 0.4% | -88.9% |
| Metais | 6 | 2.1% | 1 | 0.4% | -83.3% |
| Adubo | 0 | 0.0% | 1 | 0.4% | #DIV/0! |
| Pneus | 4 | 1.4% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Móveis | 3 | 1.0% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Plásticos | 2 | 0.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Agrotóxicos | 2 | 0.7% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Materiais de construção | 1 | 0.3% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Sementes | 1 | 0.3% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Fogos de artifício | 1 | 0.3% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Gado | 3 | 1.0% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Tijolos | 1 | 0.3% | 0 | 0.0% | -100.0% |
| Máquinas e implementos agrícolas | 1 | 0.3% | 0 | 0.0% | - |
| Madeira | 1 | 0.3% | 0 | 0.0% | - |
| Total | 286 | 100.0% | 282 | 100.0% | -1.4% |

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

De maneira geral, através deste estudo foi possível evidenciar que no país não se tem um banco de dados que concentre informações sólidas e capazes de propiciar suporte às Instituições de Segurança em estratégias de combate ao delito de roubo de cargas. Da mesma forma, o Estado do Rio Grande do Sul também carece de uma padronização na forma em

que são efetuados os registros policiais, bem como da metodologia com que é realizada a análise do indicador criminal roubo de cargas. Estatisticamente, os roubos apresentaram uma pequena queda de 1.4%, relativo ao período analisado. A média mensal variou de 23.8 roubos/mês ou 0.79 roubos/dia, em 2013, para 22.81 roubos/mês ou 0.76 roubos/dia, em 2014.

Com relação ao perfil dos roubos de cargas no RS, pode se dizer que ocorrem na maioria das vezes com êxito, ou seja, são consumados. O produto mais visado e roubado pelas quadrilhas é o cigarro. O dia da semana mais visado é a quarta-feira, enquanto que a faixa horária com maior incidência de roubos é entre 8 h e 9 h. Dentre as Rodovias Federais, a BR386 registrou o maior aumento absoluto de roubo de cargas, e dentre as Estaduais, destacou-se a RS122.

Uma vez que uma grande parte das riquezas produzidas pelos estados brasileiros, incluindo o Rio Grande do Sul, estão sendo perdidas pelas rodovias, mais de que comercializar ou distribuir os produtos, existe outro desafio que as empresas enfrentam: o roubo de cargas. Mesmo que os registros de roubos tenham diminuído, como se pode observar neste estudo, o valor das mercadorias roubadas aumentou consideravelmente no período.

Por fim, acredita-se que o estudo apresentado atingiu seu objetivo, contribuindo à padronização dos dados utilizados na tomada de decisões de autoridades ligadas à Segurança Pública do RS. Ainda colabora com o setor privado, responsável pela produção e transporte de cargas, apresentado o real cenário do roubo de carga no estado.

REFERÊNCIAS

- BRASIL (2014). *8ª Edição do Anuário Brasileiro de Segurança Pública*.
- CNT (2007). *Pesquisa CNT Rodovias 2007. Relatório gerencial. – Confederação Nacional do Transporte*. Brasília.
- DAER (2014). *Departamento Autônomo de Estradas de Rodagens*. Acessado em 11/11/14. <http://www.daer.rs.gov.br/site/index.php>
- NTC (2014). *Anuário NTC & Logística 2013/2014*.
- SIP/PROCERGS (2014). *Sistemas Informatizados Policiais Processamento de Dados do Rio Grande do Sul*. Banco de Dados.
- SINDSEG SP (2014). *Sindicato das seguradoras, previdência e capitalização do Estado de São Paulo*. Acessado em 11/11/14. <http://www.sindsegsp.org.br/site/coluna-texto.aspx?id=540>

63 Uso de simulador de conducción para evaluar el desempeño de seguridad en plazas de peaje en Puerto Rico

Didier Valdés Díaz, PhD
Benjamín Colucci Ríos, PhD
Johnathan Ruiz Gonzalez
Bryan Ruiz Cruz
Ricardo García Rosario
Enid Colón Torres

Universidad de Puerto Rico en Mayagüez

RESUMEN

Se presenta una comparación de dos configuraciones de señalización vertical en la aproximación de una plaza de peaje en Puerto Rico usando un simulador de conducción.

La primera configuración corresponde al estado actual de la señalización en la autopista, con rótulos ubicados a la orilla de la vía de rodaje. En la segunda configuración, la señalización propuesta está ubicada en pórticos metálicos elevados y con los correspondientes rótulos proyectados sobre cada carril.

El estudio de los diferentes escenarios de ambas configuraciones se llevó a cabo utilizando el simulador de conducción tipo cabina del laboratorio de factores humanos de la Universidad de Puerto Rico en Mayagüez. Un grupo representativo de 20 sujetos de diferentes grupos de edades y género fueron seleccionados con el fin de evaluar la eficacia de las dos configuraciones de señalización. Cinco zonas de interés fueron delineadas para evaluar la variable de la desviación estándar de la posición en la autopista mientras cuatro zonas fueron utilizadas para evaluar las variables asociadas a la velocidad promedio y ruido de aceleración.

Los resultados de la simulación demuestran que el comportamiento de los conductores en los escenarios con la configuración propuesta es estadísticamente significativo con respecto a la configuración actual. Por lo tanto, se infiere que la configuración propuesta es más segura que la configuración actual. Además, en la configuración propuesta se obtuvo una reducción en los cambios de carril, la velocidad promedio y el ruido de aceleración cuando los sujetos se acercaban a la plaza de peaje.

Palabras clave: Simulador de conducción, plaza de peaje, señalizaciones de tráfico.

1. INTRODUCCIÓN

Durante los pasados años ha existido un incremento en choques fatales y choques de heridos severos a nivel mundial en los sistemas de carreteras. Según la Organización Mundial de Salud (WHO por sus siglas en inglés), los choques en carreteras eran la causa número nueve en fatalidades o heridas a nivel mundial para el año 1990 y se espera que se convierta en la causa número tres para el año 2020 con un estimado de 1.9 millones de muertes por año si no se toman medidas preventivas (Peden et al., 2004; World Health Organization, 2013). Uno de los factores que contribuyen al incremento de los choques en los sistemas de carreteras son los movimientos de cambio de carril. Un componente esencial en las operaciones de una carretera que ha sido influenciado por el incremento en choques son las plazas de peajes. El propósito de esta investigación es atender e identificar soluciones costo-efectivas en términos de seguridad vial y problemas de operación relacionados con sistemas de plaza de peajes existentes.

En los últimos años se han llevado a cabo cambios en los sistemas de peajes como consecuencia de avances tecnológicos, como son los sistemas de pago electrónico (conocido como AutoExpreso, “E-ZPass” o ETC por sus siglas en inglés) y carreteras con peajes abiertos (ORT por sus siglas en inglés). Esto ha contribuido al cambio en el comportamiento de los conductores cuando se acercan a una plaza de peaje. Los sistemas de peaje tradicional crean patrones de aceleración-deceleración y complejidad en los movimientos de carriles a causa de las diferentes opciones de pago que genera un comportamiento inesperado, resultando en posibles problemas de seguridad en las plazas de peajes (Abuzwidah et al., 2014). La combinación de sistemas de pago electrónico y pagos en efectivo en plazas de peaje puede incrementar los puntos de conflictos debido a los cambios de carril de vehículos transitando a diferentes velocidades (Yang et al., 2012).

Benda et al. (2019) utilizaron un simulador de conducción de escritorio para evaluar la efectividad de señalizaciones en sistemas ORT. Los participantes en su estudio indicaron que era necesario mejorar las señalizaciones que indican el costo del peaje, incorporar flechas que indiquen el uso de los carriles y proveer letreros adicionales de advertencia cuando se aproximan a la plaza de peaje. Los simuladores de conducción han tenido un aumento en demanda por ser instrumentos de investigación eficientes y económicos para evaluar el comportamiento del conductor en sistemas de transportación. Sin embargo, esta tecnología no ha sido utilizada para estudiar sistemas de peajes que tienen diferentes carriles con múltiples métodos de cobro.

En las pasadas décadas, los sistemas de plazas de peaje fueron construidos sin utilizar un mismo estándar para los dispositivos de control de tráfico (TCD por sus siglas en inglés) que mantuviera consistencia y uniformidad en los mensajes, colores y localización (Schauffer, 1997). Versiones previas del Manual de Dispositivos Uniformes de Control de Tráfico (MUTCD por sus siglas en inglés) no contenían estándares de señalizaciones para plazas de

peajes, resultando en una gran variabilidad de diseños entre las diferentes agencias que operan plazas de peaje en Puerto Rico y Estados Unidos. En el año 2004, la Administración Federal de Carreteras (FHWA por sus siglas en inglés) comenzó a realizar estudios para analizar las condiciones existentes en las plazas de peajes y desarrollar guías de diseño que facilitaran la operación del peaje y mejoraran la seguridad (Brown et al., 2006). A partir de la edición del año 2009, se incorporó en el MUTCD el capítulo 2F titulado “Toll Road Signs” (Señalización de Carreteras con Peajes) para atender los requisitos de señalización en carreteras con peaje donde todos los carriles son utilizados para cobrar la tarifa. Según el MUTCD, la señalización debe estar localizada de tal manera que el conductor utilice la información para negociar adecuadamente los cambios que ocurren en las plazas de peaje. Uno de los elementos a considerar en la localización de la señalización es el tiempo de percepción-reacción que se define como el tiempo necesario para detectar, reconocer, tomar una decisión y reaccionar ante una situación. El MUTCD indica que las señalizaciones de advertencia de aproximación a una plaza de peaje deben ser colocadas sobre la vía a una distancia aproximada de 1 milla (1.6 Km) y ½ milla (0.8 Km) antes de llegar a la estación de peaje. Ubicar las señalizaciones de advertencia a una distancia muy alejada de la condición que busca prevenir puede ocasionar que los conductores olviden la advertencia como consecuencia de distracciones que ocurren mientras se conduce en la carretera (MUTCD, 2009).

A pesar de que se han publicado dos revisiones del MUTCD (2009), existen plazas de peaje que instalan señalizaciones que no cumplen con las indicaciones del manual, afectando la seguridad de los conductores (Dutta et al., 2014). Es importante estudiar como el comportamiento del conductor y la seguridad de los usuarios de la carretera se ven afectados por las señalizaciones existentes en sistemas de peaje que combinan sistemas de pago en efectivo y AutoExpreso. Esto crea una oportunidad para desarrollar e investigar la relación entre el comportamiento del conductor y los elementos que se encuentran en las plazas de peaje utilizando un simulador de conducción.

Una de las grandes ventajas de utilizar un simulador de conducción es la capacidad de exponer a los sujetos a situaciones donde exista una alta probabilidad de choque sin exponerlos a un daño físico. Por ejemplo, los simuladores de conducción pueden ser herramientas de investigación costo-efectivas y seguras para estudiar diferentes variables que pueden ser controladas para entender como el comportamiento de los conductores se afecta por los dispositivos de control de tráfico en zonas de trabajo (Nelson et al., 2011). Otras investigaciones se han desarrollado con simuladores de conducción para evaluar el comportamiento del conductor en asuntos de seguridad relacionadas a señalizaciones de mensajes variables, tratamientos amortiguadores de choques y otros dispositivos de control de tráfico (Watson et al., 2006; Jeihani et al., 2014; Fitzpatrick et al., 2013). Sin embargo, todavía no se ha investigado el comportamiento de los conductores cuando se acercan a una plaza de peaje y como se afecta la seguridad de los usuarios de la carretera. La Universidad de Puerto Rico Recinto de Mayagüez (UPRM), como parte del Centro de investigación

SAFER-SIM establecido en el año 2013, instaló un simulador de conducción con la capacidad de construir escenarios virtuales y estudiar aspectos de factores humanos con un enfoque en plazas de peaje. El simulador de conducción del UPRM es el primero de este tipo en Puerto Rico y está localizado en el laboratorio de ingeniería de transportación. Este simulador está compuesto de una cabina portátil que tiene la flexibilidad de utilizarse tanto en el laboratorio como en otras áreas.

Ante la falta de escenarios que se puedan utilizar en los simuladores de conducción para estudiar el comportamiento del conductor cuando se acerca a una plaza de peaje, el laboratorio de investigación de ingeniería en transportación de la UPRM, en colaboración con la Universidad de Massachusetts Amherst y la Universidad de Wisconsin, implementó un proceso para desarrollar diferentes escenarios. Se utilizaron herramientas comerciales disponibles como AutoCAD Civil 3D, Blender 2.49b, Internet Scene Assembler (ISA) y RTI Sim Creator / SimVista para generar escenarios para evaluar el comportamiento del conductor cuando se acercan a una plaza de peaje en el sistema de Puerto Rico. Esta investigación presenta el primer simulador de conducción que es utilizado en Puerto Rico para estudiar plazas de peaje que enfatiza el estudio de la efectividad de carriles de pago automático, rotulado y aspectos de seguridad, factores humanos y operaciones de plazas de peaje.

2. DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA

Inicialmente, las plazas de peaje eran diseñadas y construidas para que todos los carriles operaran con un sistema de pago en efectivo. En las pasadas décadas, estas plazas de peaje se han convertido en sistemas mixtos con carriles de pago en efectivo y carriles AutoExpreso con diferentes velocidades y usos por carril. La plaza de peaje que se está evaluando utiliza los carriles de extrema izquierda como carriles AutoExpreso para uso de vehículos livianos a una velocidad máxima de 55 mph (88 km/h). Los carriles centrales se utilizan como carriles de AutoExpreso para uso general, incluyendo vehículos livianos y pesados a una velocidad máxima de 35 mph (56 km/h). Los carriles de extrema derecha se utilizan para pagos en efectivo o recarga de la cuenta de AutoExpreso, donde el vehículo tiene que detenerse por completo al llegar a la plaza de peaje.

El problema encontrado surge a partir de la implementación de las nuevas tecnologías de cobro electrónico de peaje mezclada con pago en efectivo convencional. A pesar de que se han ido añadiendo las señalizaciones pertinentes para incluir los sistemas de AutoExpreso, no se han modificado las rotulaciones originales, creando confusión entre los conductores cuando se acercan a la zona de transición del peaje.

Se generaron dos configuraciones para estudiar el comportamiento del conductor cuando se acerca a la zona de transición que se encuentra entre la carretera y la plaza de peaje. La configuración 1 consiste en las condiciones existentes en la plaza de peaje bajo estudio,

donde las señalizaciones se encuentran en los extremos de la vía de rodaje (incluyendo señalizaciones originales y nuevas). Esta configuración se denomina señalización lateral. La configuración 2 consiste en la señalización propuesta donde los rótulos están ubicados en pórticos metálicos elevados y los letreros quedan en la parte superior de la carretera, cumpliendo con los requisitos del MUTCD. Se denomina señalización elevada.

3. VARIABLES EVALUADAS

Tres variables fueron evaluadas en la investigación: la desviación estándar de la posición del vehículo en la carretera (σ_{PC}), la velocidad promedio (\bar{V}) y el ruido de aceleración (σ_A). El ruido de aceleración se define como la desviación estándar de la aceleración de un vehículo que viaja a lo largo de un segmento (Chung y Gartner, 1973) y se puede utilizar como una variable latente relacionada con la seguridad en la carretera. Los resultados obtenidos por Boonsiripant (2009) indican que el ruido de la aceleración es la variable explicativa más importante de su modelo de regresión y tiene una correlación positiva con la frecuencia de choques en una carretera debido a que la frecuencia de choques aumenta con el incremento en el ruido de la aceleración.

4. HIPÓTESIS

El comportamiento de los sujetos que conducen escenarios en la configuración 2 va a presentar un mejor desempeño que el comportamiento de los sujetos que conducen escenarios en la configuración 1.

Con esta hipótesis se busca evaluar y comparar tres comportamientos:

1. La distribución del ruido de aceleración cuando los sujetos están expuestos a ambas configuraciones de señalización.
2. La diferencia en velocidad y la distribución del ruido de aceleración cuando los sujetos conducen por el carril de pago automático o el carril de pago en efectivo.
3. Cuando los sujetos conducen en un escenario que es de día o de noche.

5. RECURSOS UTILIZADOS

El simulador de conducción de la UPRM es un simulador tipo cabina con tres partes principales: la cabina de conducción, visualización y sonido, y su respectivo “hardware” y “software”. La cabina del simulador se encuentra en un ensamble de madera con seis ruedas para aplicaciones portátiles. La cabina incluye los siguientes elementos: asiento del vehículo, palanca de cambios, volante y pedales de freno y acelerador. La visualización de los distintos escenarios de simulación se transmite a través de tres proyectores, cada uno con su respectiva pantalla, que dan al sujeto una perspectiva de visibilidad de la carretera con un rango de visión aproximado de 120°. El audio de la simulación llega a través de un sistema de barra de sonido colocado dentro de la cabina del simulador. Para realizar la simulación, se utiliza

una estación de computadoras con el “software” provisto por RTI SimCreator / SimVista.

Para el proceso de creación de un escenario se requirió usar tres programas comerciales de computadoras. Primero se utilizó el AutoCAD Civil 3D, donde se realizó un esquema de los elementos asociados a los escenarios a investigar. Luego usando el programa Blender 2.49b, se le otorgó textura a los elementos creados. Por último, se utilizó el programa Internet Scene Assembler (ISA) donde se generan todos los elementos necesarios para realizar una simulación. La plaza de peaje modelada para esta investigación se encuentra en el Municipio de Caguas de Puerto Rico. La carretera que conduce a la plaza de peaje es parte de la autopista PR-52 que incluye tres carriles, sin rampas de entrada o salida y luego se expande a seis carriles al acercarse a la plaza de peaje. Los primeros dos carriles de izquierda a derecha son conocidos como carriles de AutoExpreso o “E-ZPass Lanes”, estos son para colección electrónica y tienen una velocidad máxima de 55 mph (88 km/h). Los mismos se utilizan exclusivamente para vehículos livianos. Los dos carriles centrales también son para cobro electrónico, sin embargo, permiten todo tipo de vehículo (liviano o pesado), a una velocidad máxima de 35 mph (56 km/h). Los últimos dos carriles son carriles de pago en efectivo, en el que el sujeto tiene que detenerse por completo (Figura 1).

6. DISEÑO METODOLÓGICO

Para llevar a cabo los experimentos en el simulador de conducción de una manera eficiente se utilizó un diseño de experimento tipo “Latin Square”. Este diseño compara dos factores y los divide en una forma tabular donde cada fila recibe un elemento único. Tiene como ventaja que se requiere un número reducido de corridas para realizar el experimento, puede comparar elementos únicos entre los factores evaluados y asegura que se encuentre un balance en el orden en el que los participantes son expuestos a la simulación; de esta forma, no se ven afectados los resultados de la investigación. Se seleccionaron 20 sujetos, pertenecientes al área metropolitana de Mayagüez y miembros de la UPRM. Las características de los sujetos se presentan en la sección de procedimiento.



Figura 1. Ilustración de la plaza de peaje simulada de Caguas Sur

Diez de los sujetos condujeron 12 escenarios con la configuración de señalización de tránsito que se encuentra en la carretera actual, la cual se definió como configuración 1. Los otros 10 sujetos condujeron 12 escenarios con una configuración propuesta que coloca los letreros utilizando un tipo de pórtico metálico elevado sobre la vía, definida como configuración 2. Los 12 escenarios utilizados en la investigación son distintos, teniendo uno o más elementos que lo hacen único dentro de la configuración. Los elementos que varían entre escenarios son: el carril de comienzo de la simulación, las condiciones del tráfico, la estación de la plaza por la cual el sujeto debe pasar y la condición de día o noche. La Tabla 1 describe los 12 escenarios.

Tabla 1. Descripción de escenarios

| Escenario | Descripción |
|-----------|--|
| 1 | Comienzo en el carril izquierdo; No Tráfico; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 2 | Comienzo en el carril izquierdo; Un vehículo al frente del sujeto; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 3 | Comienzo en el carril izquierdo; Tráfico en el carril central y de la derecha; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 4 | Comienzo en el carril izquierdo; Tráfico en todos los carriles; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 5 | Comienzo en el carril izquierdo; No Tráfico; Pasando por el carril de efectivo |
| 6 | Comienzo en el carril izquierdo; Un vehículo al frente del sujeto; Pasando por el carril de efectivo |
| 7 | Comienzo en el carril izquierdo; Tráfico en el carril central y de la derecha; Pasando por el carril de efectivo |
| 8 | Comienzo en el carril izquierdo; Tráfico en todos los carriles; Pasando por el carril de efectivo |
| 9 | Comienzo en el carril derecho; No Tráfico; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 10 | Comienzo en el carril derecho; Un vehículo al frente del sujeto; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 11 | Comienzo en el carril derecho; Tráfico en el carril central y de la derecha; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |
| 12 | Comienzo en el carril izquierdo; Tráfico en todos los carriles; Noche; Pasando por el carril de “E-Z Pass” |

Tres variables indicativas de la seguridad y que determinan el desempeño de los conductores en la vía de rodaje se recopilieron en cuatro zonas de referencia en las cercanías de la plaza de peaje y en la propia plaza de peaje. Las tres variables dependientes estudiadas fueron: la desviación estándar de la posición del vehículo en la carretera σ_{PC} , la velocidad promedio, \bar{V} , y el ruido de aceleración, en otras palabras, la desviación estándar de la aceleración, σ_A . La variable σ_{PC} fue recopilada en localizaciones donde se encontraban los letreros de ubicación de la plaza de peaje y sus respectivas estaciones de cobro. Por otro lado, los datos de las variables de velocidad promedio y ruido de aceleración se recopilieron en las zonas donde se encontraban los letreros de velocidad. Después se hicieron comparaciones entre los conductores que utilizan las dos configuraciones para determinar si existen diferencias significativas en estas variables.

7. PROCEDIMIENTO

Los sujetos que decidieran participar de esta investigación debían cumplir con los siguientes criterios: tener una licencia de motor vigente, al menos 18 meses de experiencia conduciendo y estar entre 18 a 70 años de edad. Una vez completado los requisitos, los sujetos seleccionados se dividieron en la siguiente demografía: nueve mujeres y once hombres. Ocho sujetos se encontraban entre los 18 a 25 años de edad, mientras que siete sujetos tenían edades de 26 a 55 años y otros cinco sujetos entre los 56 a 70 años de edad. El cinco por ciento de los participantes de la investigación fue excluido del estudio, debido a que este grupo experimentó síntomas de mareo relacionado al uso del simulador. La población de prueba se divide en dos grupos importantes. El primer grupo se compuso de estudiantes y otros miembros de la UPRM, que representaron el 55% de la muestra total. El segundo grupo se compuso de organizaciones sin fines de lucro del área de Mayagüez, que comprendió el otro 45% de la muestra.

Una vez el sujeto de prueba había sido elegido para participar en la investigación se le entregaba un formulario para registrar su experiencia de conducción, información demográfica y el número promedio de millas que conduce en una semana representativa. Una vez completado el formulario se le otorgó un formulario de consentimiento informado que contenía los requisitos necesarios para determinar la elegibilidad, un análisis de los riesgos de usar el simulador de conducción y una explicación general del estudio de investigación.

Luego de completar los documentos necesarios para realizar la investigación, los sujetos de investigación fueron instruidos sobre los elementos del simulador, como hacer uso de los pedales, la palanca de cambio, el volante y la señal de cambio de carril. Además, se les mostró la ubicación del espejo retrovisor y el velocímetro una vez iniciada la simulación. Antes de ejecutar los escenarios de estudio, cada sujeto corrió una simulación genérica a fin de familiarizarse con el equipo y aclarar cualquier duda que pudiesen tener. Si el sujeto sufría de algún síntoma relacionado al uso del simulador en alguna fase de la investigación, el

sujeto era excluido de la misma para no afectar el estudio. Para asegurarse de que todos los sujetos tuvieran las mismas circunstancias, se les indicó que se imaginaran conduciendo un vehículo de alquiler, con un rendimiento y sensación distinta al de su propio vehículo. No había instrucciones o incentivos que pudiesen alentar a los sujetos a conducir con seguridad, por el contrario, el objetivo era alentar a que el participante utilizara el simulador de la misma manera que conduce su propio vehículo.

8. ANÁLISIS

Para analizar el comportamiento de los sujetos en la variable de desviación estándar de la posición del vehículo en la carretera, σ_{PC} , se seleccionaron cinco zonas de referencia a lo largo de la autopista incluyendo la plaza de peaje, como se ilustra en la Figura 2. En la Zona 1, para la configuración 1, el conductor es informado que se encuentra a 1.6 kilómetros de la plaza de peaje. En la configuración 2, el conductor es informado que la plaza de peaje está localizada a una distancia de 1.6 kilómetros con la adición de la ubicación de las estaciones de cobro en la plaza de peaje. En la Zona 2 de la configuración 1 se informa al conductor que hay una plaza de peaje en 0.8 kilómetros, mientras que en la configuración 2 se le muestra la estación de peaje ubicada en cada carril y su límite de velocidad correspondiente. Los letreros de las zonas 3 y 4 de configuración 1 indican al conductor que los carriles de AutoExpreso o “E-ZPass” se encuentran en la extrema izquierda de la plaza de peaje, mientras que en estas mismas zonas para la configuración 2, los letreros indican al conductor las estaciones de peaje ubicadas en cada carril y el límite de velocidad correspondiente. La Zona 5 es la plaza de peaje, que contiene los mismos letreros en ambas configuraciones.

El rango de distancia de cada zona para la variable σ_{PC} fue seleccionado según la distancia de visibilidad mínima de un letrero según la velocidad máxima en esa sección de la autopista. El procedimiento es similar al mostrado en la tabla 4D-2 del MUTCD edición 2012. La distancia se utilizó antes del letrero y luego de haber pasado el letrero para identificar cual fue el estímulo creado por este. El rango de los datos utilizados para analizar cada zona consta de 0.31 milla (496.8 metros) en la Zona 1, 0.21 milla (334.4 metros) en la Zona 2, 0.17 milla (280.4 metros) en la Zona 3, 0.12 millas (198.1 metros) en la zona 4 y 0.15 milla (246.0 metros) en la Plaza de Peaje.

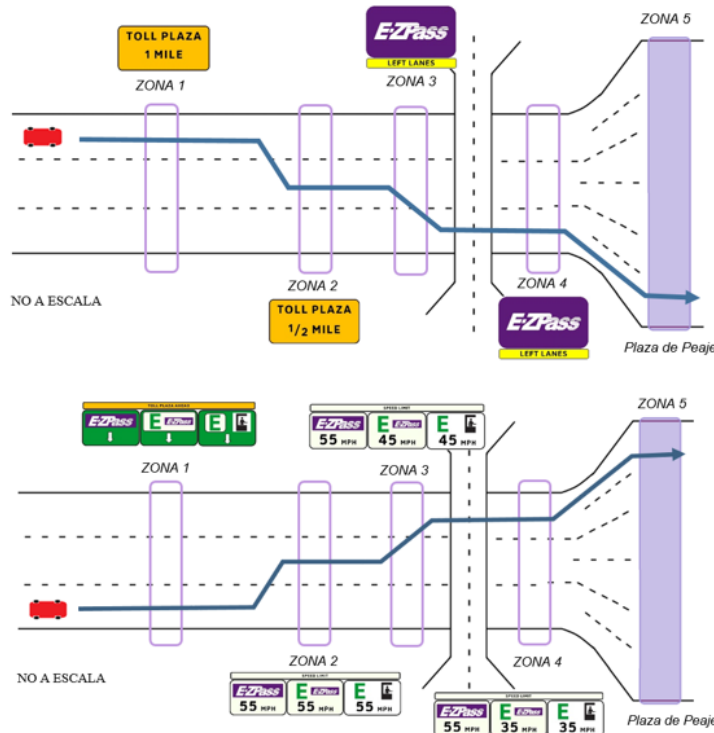


Figura 2. Vista de Tope de las configuraciones estudiadas. En la parte superior configuración 1 y en la parte inferior configuración 2

Por otro lado, para analizar el comportamiento de los conductores en la variable de velocidad promedio, \bar{V} , y el ruido de aceleración, σ_A , se seleccionaron cuatro zonas de interés como se ilustra en la Figura 3. Estas cuatro zonas de referencia corresponden a las zonas donde hay letreros que regulan la velocidad. La primera zona de referencia para la configuración 1 corresponde solamente al letrero de velocidad máxima de 55 mph. En cambio, para la configuración 2, la zona incluye un letrero con la ubicación de cada estación en la plaza de peaje y su límite de velocidad correspondiente. En la zona 2 de referencia en la configuración 1 se ilustra al conductor un letrero con la velocidad límite de 45 mph para los carriles de pago en efectivo y el letrero de velocidad máxima para el carril de pago electrónico o AutoExpreso como hemos mencionado en este estudio anteriormente. Para la configuración 2, se muestra un letrero con la ubicación de cada estación en la plaza de peaje y su límite de velocidad correspondiente. En la Zona 3, la configuración 1 sólo tiene un letrero que estipula la velocidad máxima de 35 mph para los carriles de pago en efectivo, mientras que en la configuración 2 los conductores son informados con un letrero de la posición de las distintas estaciones de peaje y su velocidad máxima correspondiente. La zona 4 de referencia es la plaza de peaje que contiene las mismas características y letreros en ambas configuraciones.

El rango de distancia para cada zona en las variables \bar{V} y σ_A es obtenido de la misma forma que para la variable σ_{PC} . El rango de los datos utilizados para analizar cada zona consta de 0.24 milla (380 metros) en la Zona 1, 0.17 milla (280 metros) en la Zona 2, 0.12 milla (198 metros) en la Zona 3 y 0.24 milla (380 metros) en la Plaza de Peaje (Valdés et al., 2015).

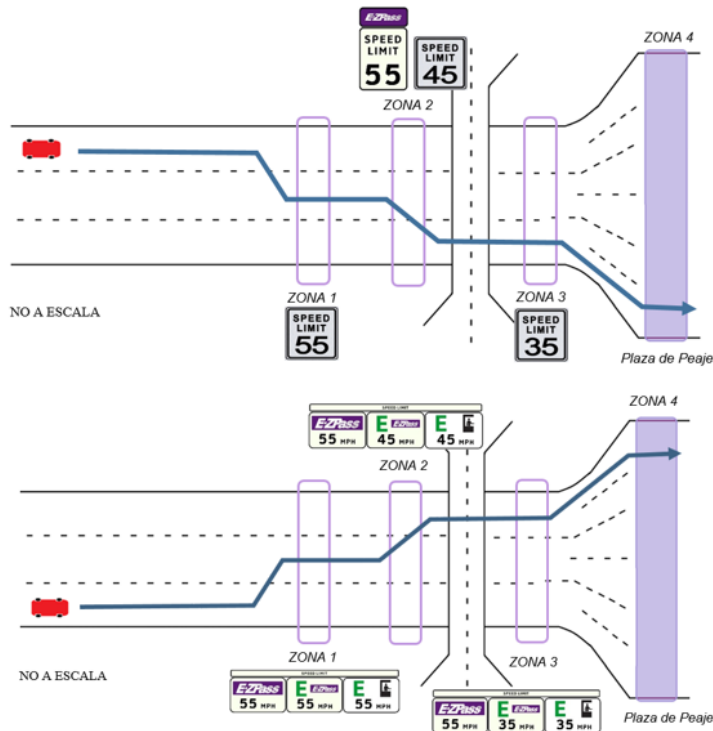


Figura 3. Vista de tope de las configuraciones estudiadas. En la parte superior configuración 1 y en la parte inferior configuración 2

Debido a la gran cantidad de pruebas de hipótesis que se realizaron en el estudio, se decidió utilizar dos modelos adicionales para eliminar la posibilidad del “Family Wise Error Rate” (FWER, por sus siglas en inglés). El FWER es la posibilidad de al menos obtener un falso positivo al realizarse múltiples pruebas de hipótesis, lo que en estadística se conoce como error de tipo 1. Se desarrolló un modelo lineal mixto con múltiples variables como se ilustra en la Ecuación 1, el cual toma en consideración la zona, la configuración y los sujetos como un efecto aleatorio para eliminar la posibilidad de que ocurra el FWER. Dos métodos distintos se utilizaron para eliminar el FWER. Para la variable desviación estándar de la posición del vehículo en la carretera se utilizó la corrección de Bonferoni. Por otro lado, para las variables de \bar{V} y σ_A , se utilizó un ANOVA en conjunto con una prueba Tukey para eliminar la posibilidad de ocurrir errores de tipo I.

$$Y_{ij} = \beta_0 + \beta_1^C + \beta_2^Z + \beta_3^{CZ} + u_i + \varepsilon_{ij} \quad (1)$$

Donde:

Y_{ij} = Variable de respuesta

β_0 = Intercepto

β_1^C = Efecto de la configuración C , para $C = 1,2$

β_2^Z = Efecto de la zona Z , para $Z = 1,2,3,4$

β_3^{CZ} = Efecto de la interacción de la configuración C y la Zona Z

u_i = Efecto aleatorio del sujeto i , para $i = 1,2,3, \dots, n$

ε_{ij} = Error de la observación j del sujeto i , para $j = 1, 2, 3, \dots, J$

n = número de sujetos

J = número de observaciones

$u_i \sim Normal(0, \sigma_u^2)$, son independientes

$\varepsilon_{ij} \sim Normal(0, \sigma_\varepsilon^2)$, son independientes

$u_i \perp \varepsilon_{ij} \rightarrow u_i$ independiente de ε_{ij}

Para determinar si existe una diferencia significativa en la variable σ_{PC} , entre las dos configuraciones, se utilizó una prueba tipo F. El valor de F se calcula como se ilustra en la Ecuación 2, con un valor-p menor a 0.05. La prueba tipo F compara la varianza de los datos entre las dos configuraciones dentro de la zona de interés. Para eliminar el efecto de “Family Wise Error”, dada la posibilidad de que ocurran falsos positivos debido a las múltiples pruebas de hipótesis realizadas se utilizó una corrección de Bonferroni para cada escenario. La corrección de Bonferroni utiliza un valor-p menor a 0.0102. Cuanto más pequeño es el σ_{PC} en cualquier zona dada, más suave es la transición de un carril a otro y menos indecisión el conductor tiene sobre qué carril debe ir para pasar por la plaza de peaje asignada.

$$F = \frac{S_X^2}{S_Y^2} \quad (2)$$

Donde:

S_X^2 = Varianza del grupo 1

S_Y^2 = Varianza del grupo 2

8.1 Análisis de la Desviación Estándar de la posición del vehículo en la carretera

En las cinco zonas evaluadas se comparó la variabilidad de la posición del vehículo entre las dos configuraciones. Se llevaron a cabo pruebas estadísticas para verificar en que situaciones se presenta una diferencia significativa en la reducción de la variabilidad de la posición del vehículo en la carretera. En los casos que se presenta diferencia significativa, se valida la hipótesis de este estudio que indica, que los sujetos en la configuración 2 tienen un mejor desempeño que los sujetos que condujeron los escenarios con la configuración 1. En la Zona 1 el único escenario que demostró diferencia significativa para la variable σ_{PC} fue el escenario 3. En la Zona 2, las diferencias que fueron significativas en la variable σ_{PC} se observaron en los escenarios 3, 11 y 12. En la Zona 3, las diferencias fueron significativas para los escenarios 4, 6, 9, 11 y 12, los cuales constituyen un 46.66% de los escenarios. En la Zona 4, las diferencias fueron significativas para los escenarios 4, 5, 8, 9, 10 y 11 que corresponden a 50% de los escenarios estudiados. Para la plaza de peaje, las diferencias fueron significativas para los escenarios 2, 7, 8, 9, 11 y 12 correspondiente al 50% de los escenarios evaluados. En la Tabla 2 se muestran los promedios obtenidos para la variable de la Desviación Estándar de la Posición del Vehículo en la Carretera, σ_{PC} .

Tabla 2. Desviación Estándar de la posición del vehículo en la carretera, σ_{PC}

| Escenario | Zona 1 | | Zona 2 | | Zona 3 | | Zona 4 | |
|-----------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| | configuración | | configuración | | configuración | | configuración | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | 95.81 | 95.92 | 95.66 | 96.03 | 95.75 | 96.25 | 95.77 | 95.59 |
| 2 | 96.44 | 98.15 | 96.43 | 97.71 | 95.87 | 96.63 | 95.76 | 95.43 |
| 3 | 95.35 * | 95.81 * | 95.40 * | 95.87 * | 95.40 | 95.57 | 95.37 | 94.61 |
| 4 | 95.69 | 96.49 | 95.78 | 96.60 | 95.57 * | 96.30 * | 95.40 * | 95.52 * |
| 5 | 99.66 | 91.36 | 101.31 | 92.74 | 102.39 | 93.33 | 102.69* | 94.00 * |
| 6 | 101.16 | 101.91 | 102.11 | 102.58 | 102.4 * | 102.96* | 103.01 | 103.25 |
| 7 | 99.51 | 99.67 | 100.76 | 101.16 | 101.01 | 102.27 | 102.33 | 103.21 |
| 8 | 99.19 | 100.59 | 101.92 | 101.55 | 102.37 | 102.39 | 102.61* | 103.36* |
| 9 | 97.56 | 98.54 | 97.45 | 96.65 | 97.34 | 95.73 | 96.14 * | 94.77 * |
| 10 | 97.95 | 98.11 | 96.94 | 97.15 | 96.79 | 96.21 | 96.69* | 94.67 * |
| 11 | 96.60 | 97.02 | 96.60 * | 95.42 * | 96.09 * | 95.43 * | 96.02 * | 94.73 * |
| 12 | 95.64 | 96.49 | 95.31 * | 96.11 * | 95.40 * | 95.90 * | 95.33 | 94.74 |

*Valor-P < 0.0102 con una corrección de Bonferroni.

Tabla 2 continuación. Desviación Estándar de la posición del vehículo en la carretera, σ_{PC}

| Escenario | Plaza de Peaje | |
|-----------|----------------|-------------|
| | configuración | |
| | 1 | 2 |
| 1 | 86.21 | 89.29 |
| 2 | 84.36 * | 87.58 * |
| 3 | 85.45 | 86.28 |
| 4 | 84.47 | 88.46 |
| 5 | 117.87 | 106.34 |
| 6 | 117.08 | 116.33 |
| 7 | 117.20 * | 115.01 * |
| 8 | 117.29 * | 117.37 * |
| 9 | 86.19* | 87.47 * |
| 10 | 87.11 | 86.39 |
| 11 | 85.36 * | 87.32 * |
| 12 | 84.53 * | 87.30 * |

*Valor-P < 0.0102 con una corrección de Bonferroni.

8.2 Análisis de la Velocidad Promedio

Para la variable de velocidad promedio \bar{V} , se combinaron las pruebas ANOVA y Tukey para determinar si los escenarios evaluados tenían diferencia significativa entre las dos configuraciones con un valor-p menor a 0.05. Las cuatro zonas evaluadas comparan la velocidad promedio entre las dos configuraciones dentro de cada escenario.

Para determinar una diferencia significativa la velocidad promedio en la zona de interés para la configuración 2 debía ser menor que la velocidad promedio en la configuración 1. Esto validaría la hipótesis de este estudio. Se encontró diferencia significativa en el escenario 8 en la zona 2 y en la zona de la plaza del peaje mostró diferencia significativa para la variable de velocidad. La Tabla 3 ilustra la velocidad promedio obtenida por configuración para cada

escenario.

Tabla 3. Velocidad Promedio \bar{V}

| Escenario | Zona 1 | | Zona 2 | | Zona 3 | | Plaza de Peaje | |
|-----------|---------------|-------|---------------|--------|---------------|-------|----------------|--------|
| | Configuración | | Configuración | | Configuración | | Configuración | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | 62.13 | 59.98 | 54.08 | 55.63 | 52.16 | 51.78 | 51.83 | 47.33 |
| 2 | 61.05 | 59.84 | 53.15 | 55.50 | 50.92 | 52.43 | 51.57 | 48.98 |
| 3 | 61.53 | 58.33 | 56.18 | 53.97 | 54.44 | 51.93 | 52.09 | 50.12 |
| 4 | 59.30 | 59.00 | 53.77 | 53.63 | 53.44 | 51.74 | 51.10 | 49.28 |
| 5 | 63.36 | 59.46 | 54.01 | 52.43 | 45.61 | 40.63 | 21.08 | 18.46 |
| 6 | 61.17 | 59.52 | 51.30 | 52.01 | 41.73 | 42.69 | 20.03 | 20.50 |
| 7 | 56.48 | 57.08 | 51.17 | 49.90 | 45.61 | 40.70 | 18.99 | 19.79 |
| 8 | 57.46 | 54.71 | 54.10* | 49.73* | 47.70 | 43.44 | 22.45* | 16.20* |
| 9 | 60.46 | 61.71 | 55.34 | 54.42 | 52.19 | 51.36 | 49.79 | 49.26 |
| 10 | 61.66 | 57.52 | 55.38 | 52.82 | 51.64 | 51.56 | 48.04 | 49.35 |
| 11 | 61.34 | 57.22 | 54.98 | 52.86 | 53.68 | 52.58 | 51.99 | 52.36 |
| 12 | 60.47 | 58.69 | 56.75 | 54.36 | 55.16 | 50.95 | 51.72 | 48.83 |

*Valor-P < 0.05

8.3 Análisis del ruido de aceleración

Para la variable ruido de aceleración (desviación estándar de la aceleración), σ_A , se utilizaron las pruebas ANOVA y Tukey para determinar si los escenarios evaluados tenían diferencia significativa entre las dos configuraciones. Un valor-p menor a 0.05 se utilizó para determinar si en efecto había una diferencia significativa entre las dos configuraciones. La prueba t utilizada para analizar la variable promedio de cada sujeto se muestra en la Ecuación 3.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{S_1^2}{N_1} + \frac{S_2^2}{N_2}}} \quad (3)$$

Donde:

\bar{x}_1 = promedio del grupo 1

\bar{x}_2 = promedio del grupo 2

S_1^2 = varianza del grupo 1

S_2^2 = varianza del grupo 2

N_1 = tamaño de muestra del grupo 1

N_2 = tamaño de muestra del grupo 2

Para eliminar la posibilidad de que ocurran falsos positivos debido a las múltiples pruebas de hipótesis realizadas, se utilizó un modelo lineal mixto. El modelo realiza una comparación entre configuraciones por cada una de las zonas seleccionadas y se determinan los valores P correspondientes. σ_A se evalúa dentro de cuatro zonas de interés, donde se compara la desviación estándar de la aceleración en los sujetos para las dos configuraciones. Una zona con diferencia significativa entre las dos configuraciones significa que la variabilidad del ruido de aceleración en la configuración 2 era menor que la variabilidad del ruido de

aceleración en la configuración 1. En la plaza de peaje se presentó diferencia significativa para la variable ruido de aceleración en los escenarios 3, 11 y 12. La Tabla 4 ilustra los promedios obtenidos en la investigación para la variable ruido de aceleración, σ_A .

Tabla 4. Ruido de Aceleración, σ_A

| Escenario | Zona 1 | | Zona 2 | | Zona 3 | |
|-----------|---------------|--------|---------------|--------|---------------|--------|
| | configuración | | configuración | | configuración | |
| | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 1 | 0.6516 | 0.2085 | 0.3497 | 0.1841 | 0.4050 | 0.5009 |
| 2 | 0.2439 | 0.3107 | 0.7469 | 0.1943 | 0.2570 | 0.2969 |
| 3 | 0.3104 | 0.2775 | 0.3539 | 0.1598 | 0.3454 | 0.5955 |
| 4 | 0.2762 | 0.2474 | 0.3029 | 0.4277 | 0.4221 | 0.1930 |
| 5 | 0.3663 | 0.1719 | 0.6129 | 0.1889 | 0.6446 | 0.5047 |
| 6 | 0.4085 | 0.2199 | 0.3604 | 0.1389 | 0.4940 | 0.1898 |
| 7 | 0.3761 | 0.2579 | 1.0173 | 0.5254 | 0.8897 | 0.5207 |
| 8 | 0.3251 | 0.4995 | 0.5138 | 0.2358 | 0.5274 | 0.4144 |
| 9 | 0.2162 | 0.1676 | 0.3313 | 0.1994 | 0.6153 | 0.1501 |
| 10 | 0.2551 | 0.1700 | 0.2960 | 0.2398 | 0.1733 | 0.1574 |
| 11 | 0.6026 | 0.1940 | 0.2852 | 0.1541 | 0.4713 | 0.1304 |
| 12 | 0.2096 | 0.2286 | 0.2669 | 0.1844 | 0.2392 | 0.1493 |

*Valor-P < 0.05

Tabla 4 continuación. Ruido de Aceleración, σ_A

| Escenario | Plaza de Peaje | |
|-----------|----------------|---------|
| | configuración | |
| | 1 | 2 |
| 1 | 0.4728 | 0.2694 |
| 2 | 0.6166 | 0.2962 |
| 3 | 0.5204* | 0.1291* |
| 4 | 0.3339 | 0.2355 |
| 5 | 2.1758 | 1.5258 |
| 6 | 1.8422 | 1.3895 |
| 7 | 2.0578 | 1.5720 |
| 8 | 1.7103 | 1.9817 |
| 9 | 0.3069 | 0.1653 |
| 10 | 0.6589* | 0.1865* |
| 11 | 0.4691* | 0.1353* |
| 12 | 0.5000 | 0.1390 |

*Valor-P < 0.05

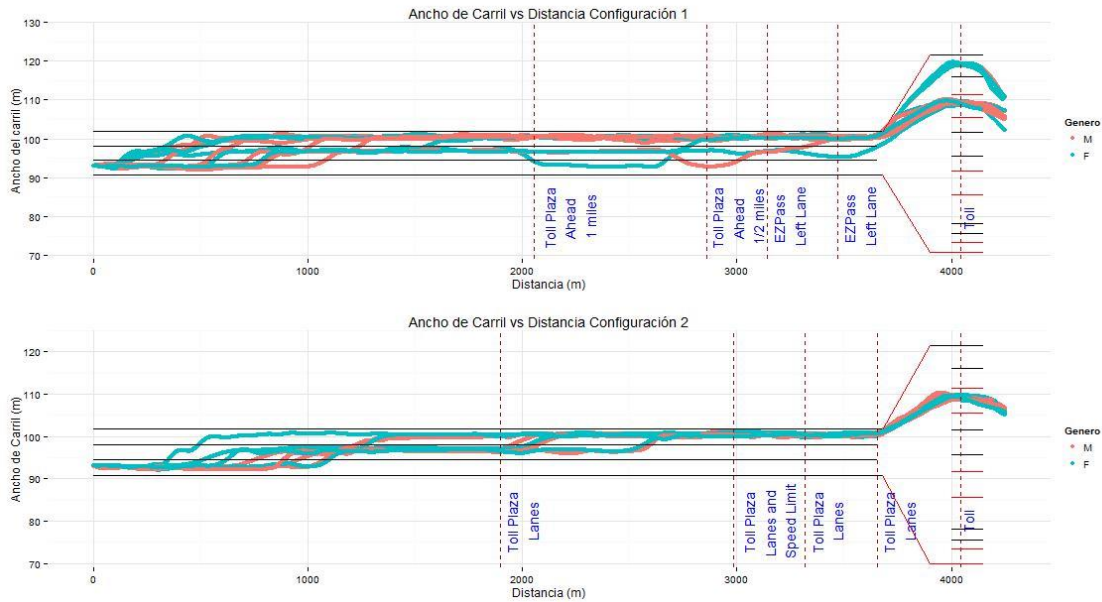


Figura 4. Vista de planta de la posición del vehículo en el escenario 11

9. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La variable desviación estándar de la posición del vehículo en la carretera, σ_{PC} , demostró ser la que mayor diferencia significativa tiene entre ambas configuraciones. En la medida que los sujetos de investigación se aproximaban al carril correspondiente de la plaza de peaje según el escenario en consideración, la diferencia significativa aumentaba en comparación de la posición anterior. El escenario 11 fue el escenario con mayor diferencia significativa para la variable σ_{PC} , teniendo diferencia significativa en 4 de las 5 zonas estudiadas. La diferencia se puede apreciar a la Figura 4, donde los sujetos que condujeron los escenarios con la configuración 2 tienen una menor variabilidad en su movimiento de translación hacia la plaza de peaje que aquellos conductores en la configuración 1.

Por otro lado, se encontró diferencia significativa en dos o más zonas en 5 escenarios adicionales, siendo estos los escenarios 3, 4, 8, 9 y 12. El escenario 3 mostró diferencia significativa en las primeras dos zonas donde se comienzan a ver los primeros letreros sobre la vía de rodaje donde indica la ubicación de cada uno de los carriles de la plaza de peaje. El escenario 4 mostró diferencia significativa en las zonas 3 y 4, justo antes de llegar a la plaza de peaje. Los escenarios 8 y 9 mostraron diferencia significativa en la zona 4 y en la plaza de peaje. Por último, el escenario 12, el cual incluye la condición de noche, resultó significativo en 3 de las 5 zonas, zona 2, 3 y la plaza de peaje.

Analizando solamente los escenarios que resultaron con diferencia significativa se puede observar un mejor posicionamiento de los conductores en cada zona, siendo las últimas dos zonas (zona 4 y plaza de peaje) las que presentan mayor diferencia. La zona 4 demostró un cambio de 14.18% y la plaza de peaje 12.81%. Estas zonas son las más importantes debido a que son las áreas de decisión donde los conductores deben elegir que carril van a utilizar

una vez lleguen a la plaza de peaje. De acuerdo con los resultados obtenidos, la configuración 2 contribuye a reducir la variabilidad asociada a los cambios de carril en las zonas cercanas a la plaza de peaje lo que redundará en mayor seguridad.

La variable de velocidad \bar{V} , presentó diferencia significativa en dos zonas para un mismo escenario. Este fue el escenario 8 donde el conductor comenzaba la simulación en el carril izquierdo y debía utilizar el carril de pago en efectivo cruzando dos carriles con tráfico en cada uno de ellos. Las zonas donde se encontró diferencia significativa para la velocidad promedio fueron la zona 2 y la plaza de peaje, donde se hizo evidente una diferencia de 8.08% y 27.84%, respectivamente. La reducción en velocidad se puede deber a que el conductor tiene que detenerse completamente en la estación de pago en efectivo.

La variable ruido de aceleración σ_A , presentó una diferencia significativa en la zona de la plaza de peaje para los tres escenarios 3, 10 y 11. Aunque la cantidad de escenarios con diferencia significativa es reducida se pudo demostrar una tendencia en el comportamiento de los conductores. Estos tres escenarios tenían como destino final pasar por el carril de AutoExpreso. Si se compara la diferencia entre la configuración 1 y la configuración 2 se observa un cambio considerable en la variable σ_A . En el escenario 3 se observó la mayor diferencia entre configuraciones con un cambio de 75.2%. El escenario 10 presentó 71.7% de diferencia y el escenario 11, 71.2%. Lo antes expuesto indica que el comportamiento de los conductores al acercarse a la plaza de peaje con pago electrónico mejora significativamente cuando se utilizan los letreros sobre la vía de rodaje, debido a que se observa menor variabilidad tanto en la aceleración del conductor como en la ubicación correcta del conductor en el carril que le corresponde. Esta combinación de factores permite establecer que el uso de letreros sobre la vía tiene el potencial de mejorar significativamente la seguridad en las plazas de peaje. Además, considerando que se ha demostrado que el ruido de aceleración se puede utilizar como una variable sustituta de la frecuencia de choques (Boonsiripant, 2009), los resultados obtenidos indican que la configuración propuesta (configuración 2) tiene el potencial de mejorar hasta 70%, la seguridad en las plazas de peaje.

Una posible explicación de la gran diferencia que se observa entre las dos configuraciones estudiadas es la siguiente: para un conductor que va en un carril particular al acercarse a una plaza de peaje es más favorable observar los rótulos sobre la vía de rodaje con letras de gran tamaño, debido a que llaman su atención y están en su cono de visión que cubre el entorno de los carriles, en contraste a tener que observar un rótulo a la orilla de carretera que está fuera de su cono de visión y con letras de menor tamaño.

Los escenarios estudiados confirman que la configuración propuesta atiende mejor los elementos necesarios para que un rótulo sea eficiente (MUTCD, 2009). Presenta mayor exposición dentro del cono de visión, mayor tamaño de letra lo cual llama la atención del conductor y es más legible y lo puede observar a tiempo para tomar una decisión adecuada y dar la respuesta esperada. Esto contribuye a tener una mayor percepción de seguridad en

la toma de la decisión correcta al llegar al carril correspondiente en la plaza de peaje (pago en efectivo o Autoexpreso). Además, en nuestro escenario un conductor que se acerca a una plaza de peaje con aumento de carriles, de facto debe tomar una decisión compleja y es en estas instancias que la instalación de rótulos sobre la vía tiene mayor efectividad.

10. CONCLUSIONES

Según los resultados obtenidos en esta publicación se desprenden las siguientes conclusiones:

- Los sujetos que condujeron los escenarios de la configuración 2, condición propuesta, presentaron un mejor desempeño en las variables σ_{PC} , \bar{V} y σ_A que aquellos que condujeron la configuración 1, la condición actual en la vía de rodaje.
- El escenario 11 fue el escenario con mayor diferencia significativa para la variable σ_{PC} , teniendo diferencia significativa en 4 de las 5 zonas estudiadas.
- La zona 4 y la plaza de peaje presentaron un cambio de 14.18% y 12.81%, respectivamente, para la variable σ_{PC} .
- Para el escenario 8 se encontró una diferencia significativa en la variable de velocidad promedio en la zona de la plaza de peaje, donde se observó hasta un 27% de reducción en la configuración 2 en comparación con la configuración 1.
- La variable σ_A demostró una diferencia significativa en la zona de la plaza de peaje donde se redujo entre un 70 a 75% en los escenarios 3, 10 y 11.

Lo antes expuesto demuestra que la configuración 2 mejora la seguridad de los conductores en comparación a la configuración 1, mejorando el posicionamiento, la velocidad y la aceleración de los conductores cuando se acercan a una plaza de peaje.

REFERENCIAS

- ABUZWIDAH, M., ABDEL-ATY, M. Y AHMED, M. (2014). *Safety Evaluation of Hybrid Mainline Toll Plazas*. Transportation Research Record No. 2435, pp. 53-60.
- BENDA, J., HOCHMUTH, J., KOWSHIK, R. Y MEDGYESY, L. (2009). *Open Road Tolling Signing Studies*. En TRB 88th Annual Meeting Compendium of Papers CD-ROM. Transportation Research Board, Washington D.C
- BOONSIRIPANT, S. (2009) *Speed Profile Variation as a Surrogate Measure of Road Safety Based on GPS-Equipped Vehicle Data*. Dissertation, Georgia Tech, Atlanta, GA.
- BROWN, L., MCDONALD, D. Y MYERS, E. (2006). *Developing Traffic Control Strategies at Toll Plazas*. ITE Journal 76(11), pp. 22–26.
- CHUNG, C. Y GARTNER, N. (1973). *Acceleration Noise as a Measure of Effectiveness in the Operation of Traffic Control Systems*. Operations Research Center Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts.
- DUTTA, A., CARPENTER, R., NOYCE, D., DUFFY, S. Y FISHER, D. (2014). *Drivers' Understanding of Overhead Freeway Exit Guide Signs*. Transportation Research Record No. 1803, pp. 102-109.

- FITZPATRICK, K., CHRYSLER, S., NELSON, A. Y IRAGAVARAPU, V. (2013). *Driving Simulator Study of Signing for Complex Interchanges*. En TRB 92nd Annual Meeting Compendium of Papers. Transportation Research Board, Washington, D.C.
- JEIHANI, M., SPELL, B. Y ARDESHIRI, A. (2014). *Speed Pattern Analysis in the Proximity of Dynamic Message Signs Using a Driving Simulator*. En TRB 93rd Annual Meeting Compendium of Papers. Transportation Research Board, Washington D.C.
- MANUAL ON UNIFORM TRAFFIC CONTROL DEVICES FOR STREETS AND HIGHWAYS, MUTCD. (2009). Washington, D.C.: U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.
- NELSON, A., CHRYSLER, S., FINLEY, M. Y ULLMAN, B. (2011). *Using Driving Simulation to Test Work Zone Traffic Control Devices*. En TRB 90th Annual Meeting Compendium of Papers DVD. Transportation Research Board, Washington D.C.
- PEDEN, M., SCURFIELD, R., SLEET, D., MOHAN, D., HYDER, A., JARAWAN, E. Y MATHERS, C. (2004). *World Report on Road Traffic Injury Prevention*. World Health Organization, Geneva.
- SCHAUFLEER, A. (1997). *Toll Plaza Design*. National Cooperative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice 240.
- VALDÉS, D., COLUCCI, B., FISHER, D., VALDES, J., COLÓN, E., GARCÍA, R. Y RIVERA, J. (2015). *Operational and Safety-Based Analysis of Toll Plaza Signage using Driving Simulation*. 2015 Road Safety and Simulation International Conference, Orlando, Florida.
- WATSON, G., PAPELIS, Y. Y AHMAD, O. (2006). *Design of Simulator Scenarios to Study Effectiveness of Electronic Stability Control Systems*. Transportation Research Record Vol. 1980, 79-86.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION (2013). *Global Status Report on Road Safety: Supporting a Decade of Action*. Luxembourg.
- YANG, H., OZBAY, K. Y BARTIN, B. (2012). *Effects of the Open Road Tolling on Safety Performance of Freeway Mainline Toll Plazas*. www.rits.rutgers.edu/files/trb2012-3885.pdf. Accessed July 17, 2015.

64 Análisis internacional: la concentración y habilidad para conducir

Fátima Pereira da Silva

InOutCister & Instituto Politécnico de Coimbra-Portugal

RESUMEN

Con el surgimiento de los vehículos autónomos y la aparición de las nuevas tecnologías, se mantiene la pertinencia de la evaluación de las exigencias del conductor. Los sistemas de información dentro del vehículo ("Intelligent Transport Systems- ITS") tienen por objetivo ayudar al conductor y delegar su intervención a las decisiones estratégicas, donde las habilidades cognitivas son más importantes que las habilidades psicomotoras. Sin embargo para que la tecnología sea eficaz, debe saber y entender qué objetivo desempeña en la tarea de conducción y qué aptitudes le son inherentes, cómo se evalúan y cómo deben ser entrenadas. Para cumplir con los nuevos requisitos y tecnologías y dada la importancia primordial que se ha atribuido al estudio de la carga mental de trabajo y su relación con los procesos cognitivos y de atención, este artículo tiene como objetivo presentar algunos modelos europeos y uno latinoamericano sobre la evaluación psicológica de conductores y examinar si la evaluación de los procesos de atención son parte de los distintos modelos analizados. La autora tiene como objetivo encuadrar las exigencias que presentan las nuevas tecnologías de los vehículos al conductor, así como presentar algunas directivas legales de evaluación psicológica, partiendo del análisis comparativo de las metodologías utilizadas en Austria, Bélgica, Colombia, Eslovaquia, España, Hungría y Portugal. Asimismo, se analiza la existencia o no de la obligatoriedad de evaluación de los procesos cognitivos en general y los que se relacionan con los procesos atencionales, teniendo en cuenta los nuevos requisitos exigidos al conductor en el siglo XXI.

Palabras Clave: Aptitud de los conductores, comportamiento de conductores, carga mental de trabajo, atención y concentración, seguridad vial, factor humano.

1. MARCO ACTUAL

Desde principios del siglo XXI la industria automovilística está cada vez más cerca de la industria aeroespacial tanto en la investigación y desarrollo como en la innovación de los vehículos autónomos y sistemas inteligentes de transporte. Los sensores de alta tecnología y dispositivos utilizados en los vehículos modernos se basan en los aparatos estudiados y validados en la aviación.

Las sofisticadas tecnologías implementadas para control y seguridad de vuelo forman parte de las rutinas de la industria de la aviación. Las preocupaciones respecto al factor humano

han acompañado este contexto y por eso es impensable imaginar que cualquiera de nosotros tomaría un vuelo comercial, aún en el más reciente avión, si sabemos que el piloto no fue evaluado correctamente (física y psicológicamente) para aquella función o que no se actualiza de forma permanente (Silva, 2015a). Como todo en la vida, el factor humano puede hacer la diferencia.

Las tecnologías no son tan buenas para hacer frente a la incertidumbre, la tarea de conducir implica que las habilidades y competencias de los conductores estén alineadas con el desempeño de conducir para que puedan hacer frente a los distintos peligros, los errores de otros conductores y una gran imprevisibilidad de otros factores. Actualmente el estudio de la carga mental de trabajo ocupa un lugar destacado, ya que relaciona los procesos cognitivos y afectivos, la percepción subjetiva del esfuerzo mental invertido y el desempeño eficaz de la tarea (Silva, 2014a). Tras la publicación de "La carga mental de trabajo" (Moray, 1979) después de una conferencia de la OTAN, varias investigaciones han surgido con relación a las implicaciones de la carga mental de trabajo y el desempeño de la seguridad (Silva, 2014b).

Hoedemaeker (2002) sostiene que la carga de trabajo está relacionada con la "cantidad" de recursos requeridos por un conjunto de tareas simultáneas, así como con el uso de los recursos necesarios para su realización. Brown y Boltz (2002) relacionan la carga mental de trabajo con el concepto de atención, enfatizando los procesos cognitivos asociados con la demanda de la capacidad de atención y la distribución de los recursos. En 1996 Håkämies-Blomqvist citado por Balbinot (2011), identificó las principales tareas involucradas en la capacidad de conducción: (a) la percepción, que permite detectar objetos, percibir y estimar la velocidad; (b) la atención, que permite actuar y centrar la atención, determinar el campo perceptivo, proporciona la capacidad de atención selectiva y de reacción ante situaciones inesperadas; (c) habilidades motoras, que permiten realizar maniobras de gran complejidad y el manejo de diferentes comandos de control de los vehículos; (d) los procesos cognitivos y conductuales, que permiten predecir el comportamiento de los demás conductores. Por eso la psicología del tráfico tiene un papel clave, ya que estudia los comportamientos humanos en el tráfico y los factores y procesos externos e internos, conscientes e inconscientes donde se originan esos comportamientos (Silva, 2015b). En este contexto, el objetivo de este estudio fue analizar los requisitos legales en varios países con respecto a la evaluación psicológica de los conductores, con especial interés en los procesos de atención, como un factor determinante de los nuevos requisitos.

2. METODOLOGÍA

Este trabajo se realizó principalmente con la colaboración del grupo de peritos internacionales de Traffic Psychology International (TPI), del cual forma parte la autora. El TPI comprende un grupo de expertos europeos en la psicología de tráfico que están trabajando para aumentar la influencia de la psicología del tráfico en el campo de la

seguridad vial en Europa y el mundo. Los miembros son de trece países de Europa y un país de América Latina.

Se presentan los resultados de cinco países y se analizaron también las políticas vigentes en España (Silva y Ortez, 2014) y Colombia.

2.1. Recopilación y análisis de datos

El cuestionario "Procedures used for the psychological assessment of drivers-TPI members-Benchmarking Process- Knowledge sharing" tiene 25 preguntas y se enfoca sobre elementos fundamentales como: (a) los requisitos para la formación de los psicólogos de tráfico; (b) los organismos de certificación y las entidades autorizadas; (c) los métodos de intervención; (d) la metodología para la certificación de la práctica y las unidades de evaluación psicológica (e) las áreas de la psicología científica que se valora en las prácticas psicológicas del tráfico (Silva, 2014a).

El cuestionario fue enviado por correo electrónico a los miembros del TPI. Los colegas que respondieron y cuyos resultados se presentan más adelante, provienen de Austria, Bélgica, Hungría, Eslovaquia y Portugal además de España y Colombia.

La recolección de los cuestionarios tuvo lugar entre mayo y junio de 2014. Además, se realizó una investigación documental cuya información fue procesada usando una versión modificada del análisis temático, como una herramienta para el reconocimiento de patrones por medio de los datos cualitativos.

El presente artículo se centra en la presentación de resultados acerca de las habilidades evaluadas en lo que respecta a los criterios establecidos en cada país para determinar la capacidad psicológica para conducir.

2.2. Resultados de la investigación

A continuación, se describen los datos recogidos acerca de las prácticas en los países de estudio, sobre la evaluación psicológica para conductores.

a) Austria:

El procedimiento de evaluación psicológica de los conductores está legislado por el derecho público (§ FSG-GV 18) y las habilidades evaluadas son: la inteligencia, la función de la memoria, la concentración, la capacidad de reacción y habilidades sensoriales motoras, tolerancia al estrés y los factores de personalidad. Se han aprobado y certificado equipos para la evaluación psicológica de conductores y las pruebas de evaluación psicológica se someten a un proceso de validación. Es el Ministerio de Transporte quien analiza y valida la aprobación de equipos y pruebas psicológicas para la evaluación psicológica de los conductores.

b) Bélgica:

Hay dos situaciones específicas que involucran la evaluación psicológica de los conductores: (a) el examen psicológico es ordenado por el juez. La ley indica varias infracciones en las cuales se debe hacer un examen (conducción bajo la influencia de drogas, de alcohol, accidentes, reincidencia, etc.); (b) Las personas con trastornos funcionales, en caso de presentar disfunción cognitiva, hacen un examen neuropsicológico. En algunos casos, estos exámenes son demandados también por las compañías de seguros (por ejemplo, si un accidente involucra un conductor de edad avanzada).

En el caso de una infracción por conducir bajo la influencia del alcohol, drogas o sustancias psicotrópicas, la información recopilada obliga a la evaluación de: (a) cuestionario o escala de auto-evaluación de abuso de productos y el uso de la medicación legal; (b) cuestionario de personalidad; (c) batería de pruebas psicológicas que mide las siguientes aptitudes: atención y concentración; memoria; procesamiento de la información; funciones ejecutivas (planificación y organización de la conducta y capacidad para resolver problemas).

c) Colombia:

El procedimiento de evaluación del conductor está regulado por la resolución 12336 del 28/DIC-2012 del Ministerio de Transporte y las habilidades evaluadas son las aptitudes perceptivo-motoras: capacidad mental y de coordinación motriz (inteligencia práctica, estimación del movimiento); coordinación integral motriz (coordinación manual, bi-manual y la coordinación entre la aceleración y el frenado). Se han aprobado y certificado equipos para la evaluación de los conductores y las pruebas de evaluación psicológica se someten a un proceso de validación. Es el Ministerio de Transporte quien analiza y valida la aprobación de equipos y pruebas psicológicas para la evaluación psicológica de conductores.

d) Eslovaquia:

El procedimiento de evaluación del conductor está legislado por el derecho público y las habilidades evaluadas son: razonamiento lógico, reacción, concentración, atención, disposición a asumir riesgos, tolerancia al estrés, rasgos de personalidad y visión periférica. Se han aprobado equipos certificados para las evaluaciones psicológicas de los conductores y las pruebas son estandarizadas por un período 10 años.

e) España:

El Real Decreto 170/2010, de 19 de febrero de 2010, vino a fortalecer algunas directivas anteriores en relación a los Centros de Reconocimiento Médico y Psicotécnico (CRMP) para comprobar la aptitud psicofísica de los conductores y determinar su capacidad. Todo centro de reconocimiento de conductores deberá disponer al menos, del material necesario para efectuar las exploraciones médica, oftalmológica y psicológica. En la exploración psicológica se contemplan pruebas libres de sesgos culturales que evalúan la inteligencia práctica y general, pruebas de personalidad y pruebas para evaluar la atención concentrada, reacciones múltiples discriminativas, velocidad anticipada, coordinación bimanual y toma de decisiones. Además, se requieren equipos homologados. El citado decreto implantó

también en España un sistema de Trámite Telemático On-Line a nivel nacional, que permite el seguimiento y control de todas las evaluaciones médicas y psicológicas de los conductores (tanto para la renovación de su permiso como para la expedición del mismo). Este tipo de iniciativas permite la captura de datos muy valiosos para el estudio y seguimiento de la población de conductores.

En el año 1985, España fue pionera a nivel mundial en este tipo de iniciativa, y a partir de la misma se han desarrollado sistemas avanzados de gestión como el STORM (Servicio Telemático Online de Reconocimientos Médicos).

f) Hungría:

En Hungría, la seguridad vial es un campo interdisciplinario. Existen ingenieros de tráfico, pedagogos de tráfico, psicólogos de tráfico, agentes de la policía de tráfico, etc. Todos ellos tienen su grado especial, excepto los psicólogos de tráfico. El Gobierno es el responsable de la definición de los procedimientos de evaluación psicológica para los conductores. El proceso de pruebas de aptitud de los conductores específicos (EPI) es regulado por el Decreto 41/2004 (IV.7) del Ministerio de Economía y Transporte (GKM). Las habilidades evaluadas son: capacidad de reacción, atención, descripción específica del tráfico, capacidad de concentración bajo circunstancias monótonas, percepción periférica, coordinación sensorio-motora, estimación de velocidad y distancia, memoria visual, inteligencia, actitudes relacionadas al tráfico y rasgos de personalidad. Tienen dispositivos de prueba para el conductor que son herramientas validadas científicamente para las evaluaciones.

g) Portugal:

En Portugal hay algunos títulos especializados en la formación de expertos para intervenir en la Seguridad Vial, sin embargo, no existe el requisito de tener una especialización en Psicología de Tráfico. El procedimiento de evaluación del conductor está legislado por el derecho público (Decreto-Ley N° 34/2014 y 138/2012). Las habilidades evaluadas son: perceptivo-cognitivas (inteligencia, atención, concentración y estimación del movimiento); psicomotoras (coordinación bimanual, elección, reacciones múltiples y discriminatorias) y factores de personalidad y psicosociales; actitudes y conductas de riesgo en relación a la seguridad del tráfico y habilidades sociales. Cuando hay dudas el psicólogo debe evaluar también la memoria, integración perceptiva, seguridad gestual, destreza manual y capacidad de multi-tarea.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Datos del European Transport Safety Council (ETSC) refieren que en 2014, 25,845 personas murieron en Estados Unidos como consecuencia de las colisiones en carreteras, que comparadas con las 26,009 de 2013, representa una disminución de sólo 0.6%, mientras que la disminución debería ser de 6.7% anual para alcanzar la meta de 2020. En 2015 se estimó

que los números aumentaron una vez más, lo que además de grave, exige la adopción de medidas rápidas y urgentes de intervención.

Trabajar en red sobre el estudio y desarrollo del perfil del conductor, las nuevas exigencias y nuevas tecnologías dentro del vehículo es obligatorio. Es necesario también consolidar estudios de investigación recurriendo a peritos del área y reforzar las asociaciones entre la administración pública (Gobierno), universidades y empresas especializadas tanto a nivel nacional como internacional, para adoptar una metodología.

Se justifica plenamente la evaluación de la carga mental del conductor pues, más allá del elevado índice de siniestralidad en las carreteras, las principales causas de accidentes son debidas a las percepciones incorrectas, atención insuficiente e incorrecto procesamiento de información (Smiley & Brookhuis, 1987). Aunque la reducida o elevada carga de trabajo sean condiciones para que este tipo de errores sucedan, no es fácil establecer una relación lineal entre la carga de trabajo mental y las causas de los accidentes (Brookhuis y De Waard, 2010). Esta relación sólo se puede traducir en el desarrollo de metodologías de evaluación de la carga de trabajo mental donde la capacidad de concentración y atención sean parte integrante del proceso de evaluación.

Nuestro artículo muestra la diversidad de aptitudes evaluadas para cumplir con el mismo objetivo. Es importante notar que, en casi todos los países, la evaluación de la capacidad de concentración es ya una realidad. Una apuesta en la evaluación psicológica computarizada, como recurso a la evaluación de desempeño sistemático de los conductores será fundamental tanto en la evaluación del candidato a conductor y su desempeño como en procesos de rehabilitación de conductores, pues la falta de atención es la principal causa de accidentes y por tanto, nuevas maneras de afrontar esta clase de riesgo son necesarias.

Un análisis sistemático de lo que está influyendo en el comportamiento humano puede ser la base para la educación básica de los conductores. En primer lugar, deben medirse las motivaciones y actitudes adecuadas de los conductores para realizar la tarea de conducción sin distracción.

Se suspenderá la licencia a aquellos conductores que carecen de capacidad de atención psicológicamente probada (por ejemplo, conductores de edad avanzada, conductores profesionales, etc.). De Waard (1996) dice que cada conductor tiene un nivel de riesgo "preferido", que cada uno está dispuesto a aceptar y cuándo el riesgo va en aumento, el conductor tiende a compensar la seguridad reducida con la adopción de otro comportamiento (por ejemplo, disminuir la velocidad).

En vista del desarrollo de nuevas tecnologías y la introducción de la telemática y de los sistemas inteligentes de transporte, es importante entender el alcance de los modelos adaptativos de control así como el rendimiento de la tarea específica que es conducir. Estos

temas serán muy importante en nuestros esfuerzos para realizar con capacidad y eficacia el trabajo de redes alrededor del mundo.

Dado que la carga de trabajo mental nos afecta a todos, surge la pregunta: ¿cuánta carga de trabajo mental es demasiada? El entrenamiento de cualificaciones, programas de formación y la utilización de simuladores de conducción (tanto en el aprendizaje, como en la formación continua y rehabilitación de conductores) serán fundamentales para el entrenamiento en atención, concentración y percepción de la exigente tarea de conducción en varios momentos, escenarios y situaciones, paralelamente a la necesidad de evaluar sistemáticamente las aptitudes de los conductores.

3.1. Recomendaciones

Vivimos en una sociedad donde la movilidad a menudo significa el acceso a una vida social y profesional, por lo que cualquier intrusión en la movilidad independiente de un individuo tiene consecuencias jurídicas, así como implicaciones personales masivas (Herle et al., 2015).

Al margen de los aspectos sociales y culturales de cada país, existe una ambición común: reducir drásticamente el número de accidentes en las carreteras y salvar el mayor número de vidas.

Las nuevas tecnologías son fundamentales para ayudar al conductor en su tarea (por ejemplo, “Advanced Driver Assistance Systems”, “Ignition interlock”, etc.); sin embargo, se debe definir un perfil de evaluación de aptitudes comunes que se centre en la evaluación de aptitudes perceptivo-cognitivas, donde la capacidad de concentración y la atención formen parte de la evaluación psicológica del conductor. También se recomienda establecer programas para: (a) la formación dirigida a candidatos a conductores, conductores y para la rehabilitación de conductores, centrada en la reducción de los comportamientos de distracción (por ejemplo, manejar y usar teléfonos celulares, sistemas de navegación u otros dispositivos portátiles; charlar con los pasajeros o con los niños sentados en el asiento trasero; fumar, comer y beber; recoger objetos; pensar sobre problemas personales o financieros, etc.) (b) empresas, dirigidos a los empresarios y a los trabajadores/conductores con políticas que premien la reducción de la conducción distraída, además de crear y entregar materiales de difusión de la seguridad vial; (c) reducir la fatiga, la velocidad, el consumo de alcohol y drogas; (d) enseñanza de competencias y ayuda para evaluar la percepción de riesgo y de la carga de trabajo mental; (d) programas para advertir a los conductores acerca de los riesgos de conducir distraídos y para que reconozcan sus propias limitaciones; (e) programas para advertir a los conductores acerca de la importancia de la atención, la distribución de recursos y los accidentes viales; (f) que todos los conductores comprendan los riesgos de actuar en tareas múltiples cuándo están conduciendo.

Esta y otras funciones forman parte de la intervención estratégica de grupos internacionales de especialidad, de los cuales el “Traffic Psychology International” es una referencia mundial, colaborando en red con varias empresas públicas y privadas a nivel internacional.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos el apoyo incondicional prestado por todos los colegas del “Traffic Psychology International” en el desarrollo de este estudio.

REFERENCIAS

BALBINOT, A. (2011). *Desenvolvimento e aplicação de um método de avaliação do comportamento de risco em condutores*. Dissertação de Pós-Graduação em Informática na Educação, apresentada à Universidade Federal do Rio Grande do Sul, sob orientação do Professor Doutor Milton Antônio Zaro.

BROOKHUIS, K. A. Y DE WAARD, D. (2010). *Monitoring drivers' mental workload in driving simulators using physiological measures*. *Accident Analysis & Prevention* 42(3), 898-903.

BROWN, W. S., Y BOLTZ, S. W. (2002). *Attentional processes in time perception: Effects of mental workload and event structure*. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 28(3), 600-615.

DE WAARD, D. (1996). *The Measurement of Driver's Mental Workload*. PhD tesis. Traffic Research Centre, University of Groningen, Haren, NL.

HERLE, M.; SUCHA, M.; PEREIRA DA SILVA, F.; Y WAGNER, T.(2015). *Performance Tests in Driver Assessment*. Traffic Psychology International. Available on: http://traffic-psychology-international.eu/?page_id=28

HOEDEMAEKER, M. (2002). *Summary Description of Workload Indicators: WPI Workload Measures. Human Machine Interface and the Safety of Traffic in Europe Growth Project. GRD1-2000-25361*. HASTE. Institute for Transport Studies. Leeds, UK: University of Leeds.

MORAY, N. (1979). *Mental Workload*. New York, N.Y.: Plenum.

SILVA, M. F. S. (2015a). *Mental Workload, Driving Task and Intelligent Transport System*. En Conference Program: Human factors of automated driving - Autonomous Vehicles – Test & Development- Symposium 2015, and Automotive Testing.

SILVA, M.F.P. (2015b). *The importance of psychological assessment, risk behaviour and driver's perception*. 47th CIECA Congress 2015 - Personal resources for safe driving – Acting for the future CIECA- International Commission for Driver Testing (Berlin) on 8th, May, 2015 http://www.ciecacongress2015.eu/dok_view?oid=513418,

SILVA, M. F. P. Y ORTEZ, F. (2014). *Road Accidents –The Mundial requirements and the Iberian context*. IV Ibero-American Seguridad Vial, Cancún, Mexico.

SILVA, M.F.P. (2014a) *Methodologies for psychological assessment of the contribution from drivers- Traffic Psychology International*. Transport and Trends 2014-International

Scientific Conference on Traffic and Transport Psychology. Banská Bystrica, Slovakia.

SILVA, M.F.P (2014b). *Workload, Task Demand and Driving Performance: What Relation?* Procedia - Social and Behavioral Sciences (162), 310-319. <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.12.212>

SMILEY, A. Y BROOKHUIS, K. A. (1987). *Alcohol, drugs and traffic safety*. En J. A. Rothengatter & R. A. De Bruin (Eds.), *Road Users and Traffic Safety* (pp. 83-105). Assen, N. L.: Van Gorcum.

65 Construcción de un modelo de red vial georreferenciado para la gestión de información de accidentes viales y otras características físicas y operativas

Noelia Villegas Villegas

Alberto Mendoza Díaz

Instituto Mexicano del Transporte, México

RESUMEN

La construcción de un modelo de red vial georreferenciado es un insumo requerido para estudios de modelación de redes de transporte, así como también para la representatividad de los datos de accidentes viales. La actualización del modelo con carreteras segmentadas cada 500 m y la vinculación de sus características físicas y geométricas requieren de la migración de métodos y procedimientos que simplifiquen las actividades para su realización. Lo anterior, debido a la existencia de bases de datos con información de tránsito vehicular, mediciones del índice internacional de rugosidad, accidentes viales, velocidades de punto, etc., las cuales generalmente contienen una gran cantidad de registros y cuyo contenido cambia año con año. Por tanto, este trabajo muestra los procedimientos de segmentación dinámica y algoritmos de programación que coadyuvan para construir un modelo de red vial útil para estudios de modelación de redes de transporte, estimación de costos de operación vehicular, generación de estadísticas de accidentalidad por segmento, tramo y carretera, así como para la representatividad de los datos de accidentes viales.

Palabras clave: Modelo de red vial, segmentación dinámica y algoritmos de programación.

1. INTRODUCCIÓN

El Internet ha cambiado la forma de acceder, procesar, compartir y manipular los datos de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). A pesar de todos los datos digitales en línea ahora disponibles y el poder infinitamente aumentado de los SIG, es todavía común gastar el 80% o más de los recursos de un proyecto en buscar, descubrir, evaluar, recuperar y mejorar los datos. Los buenos datos son esenciales, pero los otros componentes de un proyecto de SIG también son esenciales y pueden ser más valiosos. El “software”, los algoritmos y los métodos también son vitales y de ser evaluados por bit casi seguramente tendrán un valor mayor que una gran cantidad de datos (Peng y Tsou, 2003).

Actualmente en muchos países, los SIG en el ámbito del transporte requieren conformar métodos para la vinculación de enormes bases de datos con información georreferenciada previamente clasificada. Este trabajo muestra la actualización de una metodología para dicho

requerimiento, mediante la aplicación de segmentación dinámica y algoritmos de programación, los cuales ya se han aplicado en proyectos para la solución de problemas concretos de transporte, tales como accidentes viales y costos de operación.

La elaboración de un modelo de red vial georreferenciado con asignación de características físicas y operativas es un requerimiento que amerita la migración y actualización de procedimientos que simplifiquen el manejo de nueva información espacial de carreteras conjuntamente con información contenida en bases de datos. Inicialmente los procedimientos de segmentación dinámica para la creación de una red de carreteras segmentada cada 500 m fueron definidos con el “software” ArcInfo (Esri, 1995), dichos procedimientos están detallados en un capítulo de una tesis de maestría del 2011 (Villegas, 2011). Actualmente, el modelo de red vial que requiere la actualización mencionada es utilizado entre otras cosas, para el conocimiento de los sobrecostos de operación vehicular. Adicionalmente, se visualiza también una aplicación útil para la gestión y representatividad de la información de accidentes viales en carreteras federales.

2. DIVISIÓN Y CLASIFICACIÓN DE CARRETERAS CONSIDERANDO LOS PRINCIPALES TRAMOS CARRETEROS QUE LAS INTEGRAN

La información georreferenciada de la Red Carretera Federal (RCF) utilizada para dividir y clasificar carreteras fue obtenida a partir de coordenadas geográficas registradas por el Programa Internacional de Evaluación de Carreteras (IRAP, por sus siglas en inglés), como parte del proyecto iRAP-México. Específicamente, las carreteras seleccionadas en la RCF para llevar a cabo este trabajo forman parte del corredor longitudinal México-Nuevo Laredo en México.

El “software” comercial para Sistemas de Información Geográfica (SIG) usado para procesar los datos fue ArcMap 10, desarrollado por el Instituto de Investigación de Sistemas Ambientales (ESRI, por sus siglas en inglés). A continuación, se muestra paso a paso el proceso realizado con la información.

2.1 División de carreteras

Como primer paso, las carreteras fueron divididas y clasificadas considerando los principales tramos carreteros que las integran, así como también la clasificación oficial de carreteras de la Dirección General de Servicios Técnicos (DGST). Esto facilita en una etapa posterior, la aplicación de segmentación dinámica en la RCF y la asignación de atributos tales como el aforo vehicular, el cual es asignado al tramo carretero de acuerdo con la ubicación de la estación de aforo.

Iniciar con un catálogo de tramos carreteros es de mucha utilidad para llevar a cabo la división manual de las carreteras, principalmente si pretendemos obtener estadísticas por entidad federativa, por carretera, tramo o segmento de determinada longitud. La Tabla 1

muestra un ejemplo de la información básica incluida en el catálogo de tramos: identificador del tramo carretero “id_unico”; número de la entidad federativa “entidad”; identificador de la carretera “idcarr”; número consecutivo del tramo “id_tramo”; nombre origen-destino del tramo “nombre_tramo”; y kilómetro inicial “kmi” y final “kmf” del tramo carretero.

Tomando en cuenta lo que indica el catálogo de tramos carreteros, las líneas georreferenciadas de las carreteras fueron divididas manualmente. Para realizar los cortes de línea fue necesario ubicar exactamente el sitio donde inicia y termina cada tramo carretero. Durante este proceso, es importante verificar información georreferenciada de los Datos Viales de la DGST, los postes de kilómetro, las localidades, los límites estatales y las casetas de peaje.

2.2 Clasificación de tramos carreteros

Después de dividir la carretera, fue necesario clasificar cada tramo carretero mediante la asignación del identificador “id_unico”. Este identificador está compuesto por uno o dos dígitos para la entidad federativa, cinco para la carretera y dos para el número consecutivo del tramo. En el caso de que el número de la carretera o del tramo contenga menos de cinco o dos dígitos respectivamente, es necesario preceder el identificador con los ceros faltantes, p. ej. la clave 100000601 corresponde a la entidad federativa 10, carretera 00006 y tramo 01. Mientras que la clave 60658503 corresponde a la entidad federativa 6, carretera 06585 y tramo 03.

Posteriormente, el proceso de segmentación dinámica en ArcMap asigna a cada segmento de 500 m una nueva clave numerada, a partir del correspondiente tramo carretero al que pertenece.

Tabla 1. Catálogo de tramos carreteros

| Id_unico | Entidad | Idcarr | Id_tramo | Nombre_tramo | Kmi | Kmf |
|-----------------|----------------|---------------|-----------------|---|------------|------------|
| 90041101 | 9 | 00411 | 01 | México - Lim. Edos. D.F./Mex. | 0 | 11.3 |
| 150041102 | 15 | 00411 | 02 | Lim. Edos. D.F./Mex. - Caseta Tepotzotlán | 11.3 | 43.2 |
| 150041103 | 15 | 00411 | 03 | Caseta Tepotzotlán - Entronque Jorobas | 43.2 | 56.2 |
| 191908601 | 19 | 19086 | 01 | T. C. (Monterrey - Nuevo Laredo (Libre)) - T. Der. Agualeguas | 24 | 79.5 |
| 191908602 | 19 | 19086 | 02 | T. Der. Agualeguas - X. C. (Gral. Treviño - Villaldama) | 79.5 | 99.5 |

En esta clasificación de tramos carreteros, es recomendable verificar que existe sólo una línea por cada tramo carretero o identificador “id_unico”. La herramienta de geoprocésamiento de ArcMap “Fusionar” ayuda a fusionar segmentos de línea en una sola línea. También es importante verificar la dirección correcta de la carretera, es decir, asignar a la línea la dirección en que crece el cadenamamiento en campo. La herramienta de geoprocésamiento “Invertir línea” facilita esta tarea.

La clasificación por tramos de carretera en este caso es la más adecuada, ya que cuando existe una pequeña diferencia entre la longitud de dos postes de kilómetro, comparando la distancia de los mismos en campo y la real en el “software” para SIG, esto no afecta la distancia entre el kilómetro inicial y final de los tramos posteriores.

La Figura 1 ilustra un ejemplo de algunos tramos carreteros con identificador “id_unico” clasificados manualmente, los cuales forman parte del corredor longitudinal México-Nuevo Laredo y que son segmentados en la siguiente etapa.

3. SEGMENTACIÓN DINÁMICA EN LOS TRAMOS CARRETEROS, USANDO ARCMAP

Después de la división y clasificación de los datos espaciales, fue realizada la segmentación dinámica en los tramos carreteros, a fin de generar los segmentos de 500 m con identificadores numéricos que facilitan la ubicación de los mismos, mediante las herramientas de referenciación lineal del “software” para Sistemas de Información Geográfica (SIG) denominado ArcMap versión 10.

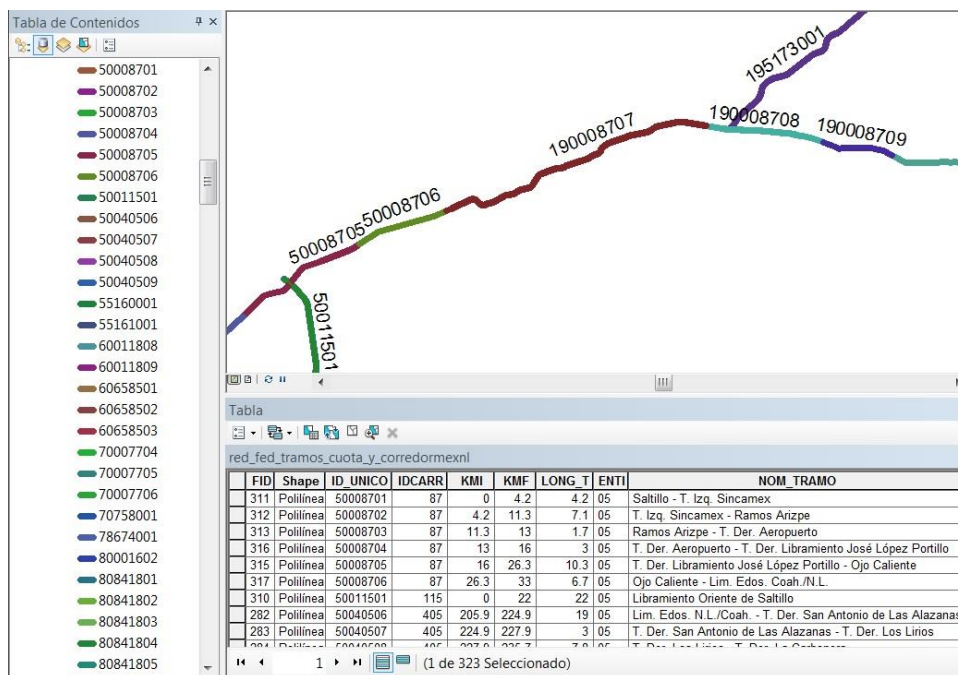


Figura 1. Tramos carreteros con identificador “id_unico”

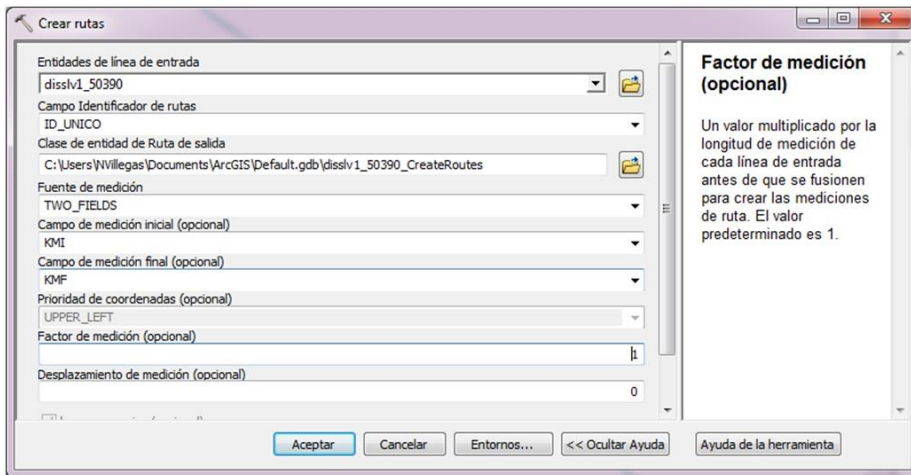


Figura 2. Creación del sistema de rutas

La segmentación dinámica es el proceso de calcular la ubicación en el mapa de los eventos almacenados en una tabla de eventos. La segmentación dinámica permite asociar varios conjuntos de atributos a cualquier parte de una entidad lineal (ArcGIS 10, 2012).

La migración de procedimientos de segmentación dinámica de la versión anterior ArcInfo a la versión actual ArcMap, consistió de tres etapas: creación de rutas, creación del archivo de eventos de línea y creación de la capa de eventos de ruta. Estas etapas están descritas a continuación.

3.1 Creación de rutas

Con la herramienta “crear rutas” se generan las rutas a partir de los tramos carreteros clasificados con “id_unico”. Como muestra la Figura 2, en el cuadro de diálogo es necesario agregar el nombre de las entidades de línea de entrada o tramos carreteros clasificados (archivo shape de líneas); el campo identificador de las rutas o tramos “id_unico”; la clase de entidad de rutas de salida; fuente de medición “two_fields”; y el campo de medición inicial y final del tramo carretero “kmi” y “kmf”.

3.2 Creación del archivo de eventos de línea

El archivo de eventos de línea contiene en cada registro información básica de todos los segmentos que integran cada carretera: identificador del tramo carretero “id_unico”; identificador del segmento “id_seg”; identificador de la carretera “idcarr”; límite inferior del segmento “l_inf”; límite superior del segmento “l_sup”; kilómetro inicial “kmi”; y kilómetro final “kmf” del segmento. El límite inferior del segmento está formado por el número de la carretera, tres dígitos para el cadenamiento inicial en número de kilómetro y tres dígitos para el número de metros. El límite superior del segmento está formado por el número de la carretera, tres dígitos para el cadenamiento final en número de kilómetro y tres dígitos para el número de metros.

El algoritmo de programación crea_archivo_eventos.prg, elaborado con el “software”

Microsoft Visual FoxPro, crea el archivo de segmentos de 500 m a partir del catálogo de tramos carreteros. En el algoritmo una variable almacena la longitud deseada de los segmentos, la cual puede cambiar de acuerdo con la longitud de segmentos seleccionada para el proceso. La Tabla 2 muestra sólo algunos registros del archivo de eventos de línea generado con el algoritmo.

3.3 Creación de la capa de eventos de ruta

La herramienta “crear capa de eventos de ruta”, genera las carreteras segmentadas de acuerdo a lo que señala el archivo de eventos de línea. Como se muestra en el cuadro de diálogo de la Figura 3, es necesario agregar el nombre de las entidades de ruta de entrada, archivo de rutas generado en el punto 3.1; el campo identificador de rutas “id_unico”; la tabla de eventos de entrada, archivo de eventos creado en el punto 3.2; el tipo de evento “line”; y el campo de medida inicial y final, es decir, kilómetro inicial y final “kmi” y “kmf” del segmento.

Finalmente, la Figura 4 ilustra un ejemplo de las carreteras segmentadas a cada 500 m con identificador “id_seg”, resultado de la aplicación de la herramienta que crea los eventos de ruta. Esta herramienta generó un segmento de 500 m por cada registro contenido en el archivo de eventos de línea.

El proceso de referenciación lineal está representado en la Figura 5, con la modelación de elementos lineales y ubicación espacial de los eventos o accidentes viales.

Tabla 2. Archivo de eventos de línea

| Id_unico | Id_seg | Idcarr | L_inf | L_sup | Kmi – Kmf |
|-----------------|---------------|---------------|--------------|--------------|------------------|
| 150041103 | 150041103001 | 00411 | 411043200 | 411043700 | 43+200 - 43+700 |
| 150041103 | 150041103002 | 00411 | 411043700 | 411044200 | 43+700 - 44+200 |
| 150041103 | 150041103003 | 00411 | 411044200 | 411044700 | 44+200 - 44+700 |
| 150041103 | 150041103004 | 00411 | 411044700 | 411045200 | 44+700 - 45+200 |
| 150041103 | 150041103005 | 00411 | 411045200 | 411045700 | 45+200 - 45+700 |

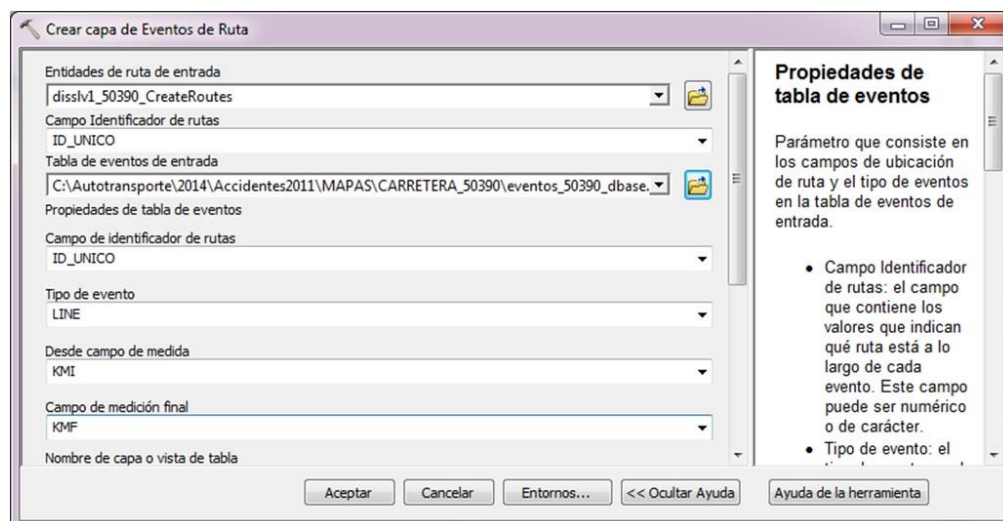


Figura 3. Creación de la capa de eventos de ruta

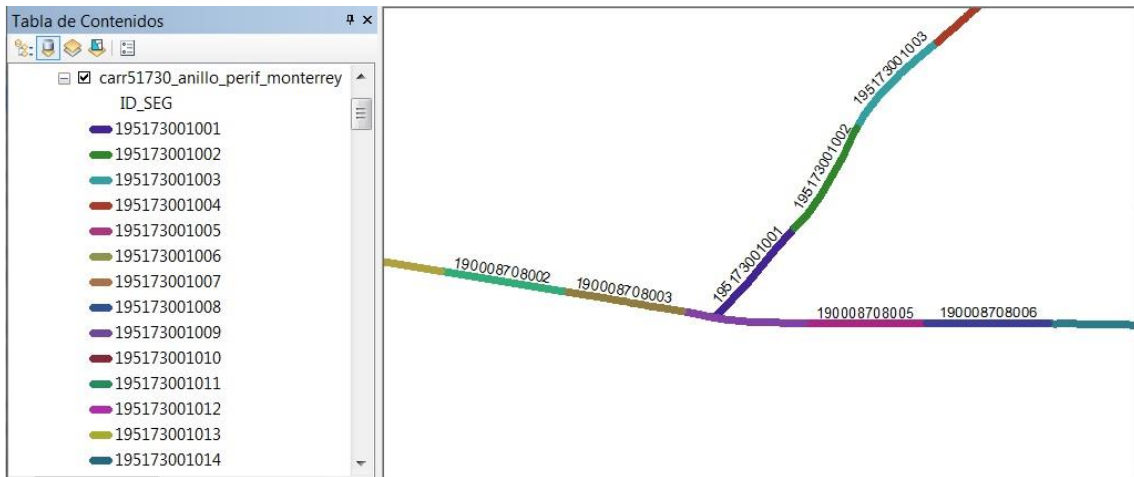


Figura 4. Segmentos de 500 m con identificador “id_seg”

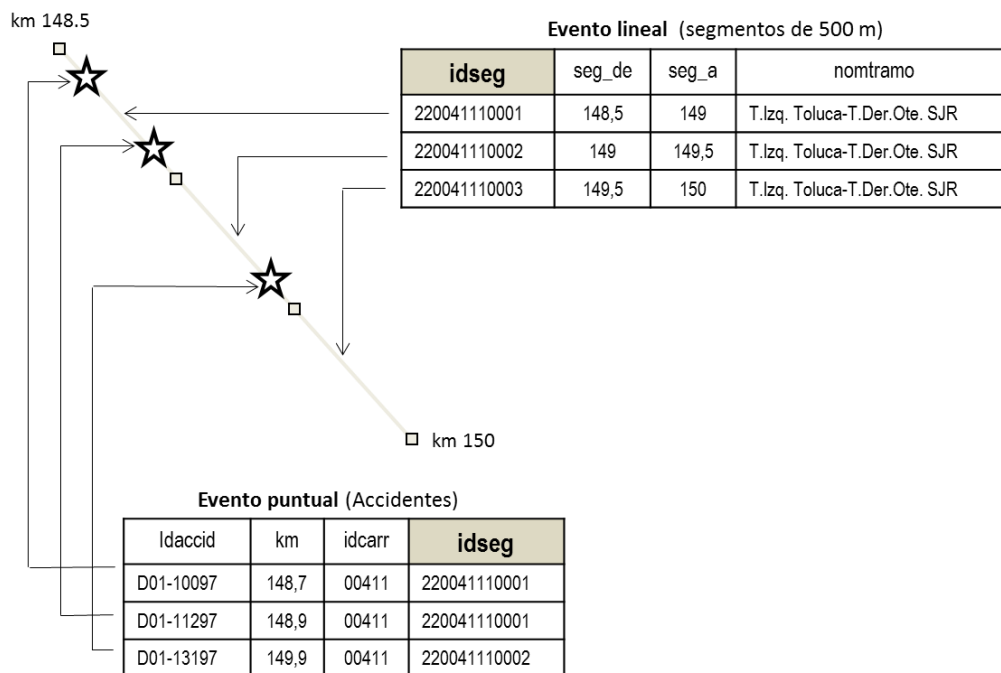


Figura 5. Modelación de elementos lineales y ubicación espacial de eventos

4. ASIGNACIÓN DE ATRIBUTOS

Una vez que se cuenta con una RCF clasificada y segmentada, es posible asignar a cada segmento o tramo carretero sus atributos correspondientes, de dos formas:

1) La primera, consiste en relacionar el identificador del segmento con las bases de datos que contienen índices de accidentes viales, tránsito vehicular, velocidades y mediciones del índice internacional de rugosidad (IRI, por sus siglas en inglés). En este caso, es necesario que las bases de datos contengan el identificador de la carretera “idcarr”, así como el kilómetro correspondiente en cada registro. La Figura 6 muestra este proceso de vinculación de los datos.

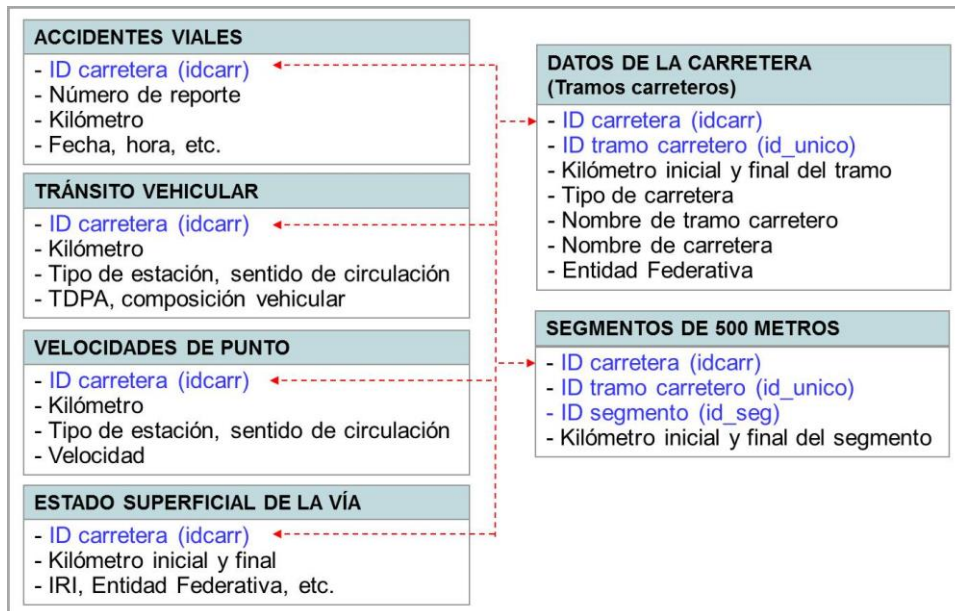


Figura 6. Vinculación de la información

2) La segunda forma de asignar atributos es mediante la herramienta de “software” para SIG, denominada “Unión espacial”, en la cual los atributos de otros elementos georreferenciados son asignados a los segmentos de 500 m de acuerdo a la posición geográfica más cercana o bien, a una distancia establecida en el proceso de vinculación. En este caso, no es necesario contar con información relativa al identificador de la carretera o el cadenamiento de la misma.

A continuación, se describe con más detalle el proceso de vinculación de índices de accidentes viales, tránsito vehicular, velocidades de punto y estado superficial de la vía con los segmentos y tramos carreteros.

4.1 Asignación de índices de accidentes viales a segmentos de 500 m

La Policía Federal provee la Base de Datos que contiene información de los reportes de los accidentes de tránsito registrados en la RCF. Primero, es necesario asignar un identificador de carretera “idcarr” a cada registro de accidente en la Base de Datos.

Después, considerando el “idcarr” y el kilómetro donde ocurrió el incidente, se asigna a la Base de Datos de accidentes de tránsito el identificador de segmento “id_seg” que le corresponde, del archivo de eventos de línea creado en el punto 3.2. Este proceso fue realizado con el algoritmo de programación `asigna_id_segmento.prg`.

Por último, fue elaborado un resumen de accidentes viales por segmento “id_seg” con el algoritmo de programación `resum_accid_porsegm500m.prg`. El resumen incluyó “idcarr”, kilómetro inicial y final del segmento, número de accidentes, muertos, lesionados, números de reportes de accidentes registrados en el segmento, así como el indicador Número de Accidentes Equivalente (NAE). Este último indicador fue obtenido con la Ecuación 1.

$$NAE = accidentes + (muertos*6) + (lesionados*2) \quad (1)$$

La Tabla 3 muestra sólo algunos registros del archivo, con el resumen de accidentes viales por segmento.

Finalmente, la información del resumen por segmento fue asignada directamente a los segmentos a través del identificador “id_seg”, con la herramienta “Join” de ArcMap.

4.2 Asignación de tránsito vehicular a tramos carreteros

La Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes edita los Datos Viales (SCT, 2014) con información del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA). Estos aforos son asignados al catálogo de tramos carreteros.

Como primer paso se asigna un identificador de tramo “cartram” a cada registro de la Base de Datos con TDPA. Este identificador está formado por el identificador de carretera “idcarr” y un número de tramo consecutivo, que en cada carretera inicia con uno, incrementa y finaliza con el total de tramos que forman la carretera. Este proceso fue realizado con el algoritmo de programación crea_cartram_dv.prg.

Posteriormente, el TDPA en tramos con el mismo nombre y sentido de circulación “SC” 1 y 2 fue sumado. Para el resto de los TDPA la cantidad pasa igual a un nuevo campo. Lo anterior fue realizado para calcular el aforo promedio de ambos sentidos de circulación en cada tramo carretero. Este proceso fue realizado con el algoritmo de programación tdpasumas.prg. La Tabla 4 muestra sólo ocho campos y algunos registros de los 7,719 que en el año 2013 integraron la información de aforos, después de aplicar los dos algoritmos ya mencionados.

Tabla 3. Resumen de accidentes viales por segmento

| Id_seg | Id carr | Kmi – Kmf del segmento | Accidentes | Muertos | Lesionados | Reportes de accidentes | NAE |
|--------------|---------|------------------------|------------|---------|------------|---------------------------------|-----|
| 150041103001 | 411 | 43+200-43+700 | 3 | 0 | 13 | 21503, 11361503, 12201503 | 29 |
| 150041103003 | 411 | 44+200-44+700 | 2 | 1 | 8 | 741503, 1451503 | 24 |
| 150041103004 | 411 | 44+700-45+200 | 1 | 0 | 2 | 12071503 | 5 |
| 150041103005 | 411 | 45+200-45+700 | 1 | 0 | 0 | 10481503 | 1 |
| 150041103006 | 411 | 45+700-46+200 | 1 | 1 | 0 | 11031503 | 7 |
| 150041103010 | 411 | 47+700-48+200 | 2 | 0 | 0 | 10251503, 11561503 | 2 |

Tabla 4. Archivo con información de TDPA

| Idcarr | Carrtram | Nom_tramo | Km | TE | SC | TDPA | TDPA_SUM |
|---------------|-----------------|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-----------------|
| 411 | 41101 | México | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 411 | 41102 | Lim. Edos. term. D. F. ppia. Mex. | 11.30 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 411 | 41103 | Caseta de Cobro Tepotzotlán | 43.01 | 2 | 1 | 25513 | 51026 |
| 411 | 41104 | Caseta de Cobro Tepotzotlán | 43.01 | 2 | 2 | 25513 | 0 |
| 411 | 41105 | Ent. Jorobas | 56.18 | 1 | 1 | 25483 | 51460 |
| 411 | 41106 | Ent. Jorobas | 56.18 | 1 | 2 | 25977 | 0 |

Tabla 5. Catálogo de tramos carreteros con TDPA asignado

| Id_unico | Carrtram_origen | Carrtram_destino | TDPA |
|-----------------|------------------------|-------------------------|-------------|
| 150041102 | 41103 | 41104 | 51026 |
| 150041103 | 41105 | 41106 | 51460 |
| 191908602 | 1908601 | 1908602 | 26165 |
| 191908603 | 1908603 | 1908604 | 11056 |

Por otra parte, en cada registro del catálogo de tramos carreteros fue asignado el identificador “carrtram” origen y destino que corresponde de la Base de Datos con TDPA, considerando el nombre del tramo y el kilómetro inicial y final, a fin de vincular la información. El sentido de circulación y el cadenamiento fue verificado antes de asignar el “carrtram” origen y destino, debido a que la información de aforos vehiculares inicia la mayoría de las vías con un kilómetro igual a cero, mientras que el catálogo de tramos carreteros sí considera el kilómetro real de inicio y fin de cada tramo.

Finalmente, el algoritmo de programación vincula_aforos.prg vincula el identificador carrtram origen y destino del catálogo de tramos carreteros con el identificador carrtram de la Base de Datos con TDPA y calcula promedios por configuración vehicular.

La Tabla 5 muestra un ejemplo de algunos registros con el identificador carrtram origen y destino que corresponde de la Base de Datos con TDPA, así como el valor asignado de tránsito vehicular.

4.3 Asignación de velocidades de punto a tramos carreteros

La DGST de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes edita la información de velocidades de punto (SCT, 2014). Estas velocidades son asignadas al catálogo de tramos carreteros mediante el algoritmo de programación vincula_velocidades.prg. Este algoritmo utiliza un procedimiento similar al aplicado en el punto anterior 4.2 para asignación de TDPA, vincula el identificador “carrtram” origen y destino y asigna la velocidad en cada registro del catálogo de tramos carreteros.

4.4 Asignación de estado superficial de la vía a segmentos de 500 m

En el caso del estado superficial de la vía también fue posible realizar la asignación mediante la herramienta de “software” para SIG, denominada “Unión espacial”.

Como primer paso, es necesario crear datos espaciales a partir de la información de IRI registrada cada veinte metros y proporcionada también por la DGST. La herramienta “Agregar datos X,Y” de ArcMap ayuda a agregar datos de coordenadas X,Y como una capa. La Tabla 6 muestra algunos registros del formato con la información de IRI.

Después de crear los datos espaciales se aplica la herramienta “Unión espacial” con los datos requeridos, como se muestra en la Figura 7. En entidades de destino se agrega el nombre de la capa de nodos pertenecientes a los segmentos de 500 m; para esto es necesario aplicar previamente la herramienta “Vértices de entidad a puntos” de ArcMap a los segmentos de 500 m creados en el punto 3.3; en entidades de unión se agrega el nombre del archivo tipo “shape” con IRI, creado después de usar la herramienta “Agregar datos X,Y”; en clase de entidad de salida se agrega el nombre del archivo resultado de la unión espacial; y en tipo de operación se escoge “join_one_to_one” unión espacial al nodo más cercano.

Tabla 6. Archivo con información de IRI

| Clave del tramo | Sentido | Carril | Kmi | Kmf | Longitud (X) | Latitud (Y) | IRI (izq, der) |
|-----------------|---------|--------|--------|--------|--------------|-------------|----------------|
| A-064-01 | 1 | 1 | 43+000 | 43+020 | -99.207327 | 19.714556 | 2.25 |
| A-064-01 | 1 | 1 | 43+020 | 43+040 | -99.207355 | 19.714735 | 1.92 |
| A-064-01 | 1 | 1 | 43+040 | 43+060 | -99.207390 | 19.714912 | 2.71 |
| A-064-01 | 1 | 1 | 43+060 | 43+080 | -99.207427 | 19.715090 | 13.58 |
| A-064-01 | 1 | 1 | 43+080 | 43+100 | -99.207465 | 19.715267 | 12.48 |
| A-064-01 | 1 | 1 | 43+100 | 43+120 | -99.207502 | 19.715444 | 11.56 |

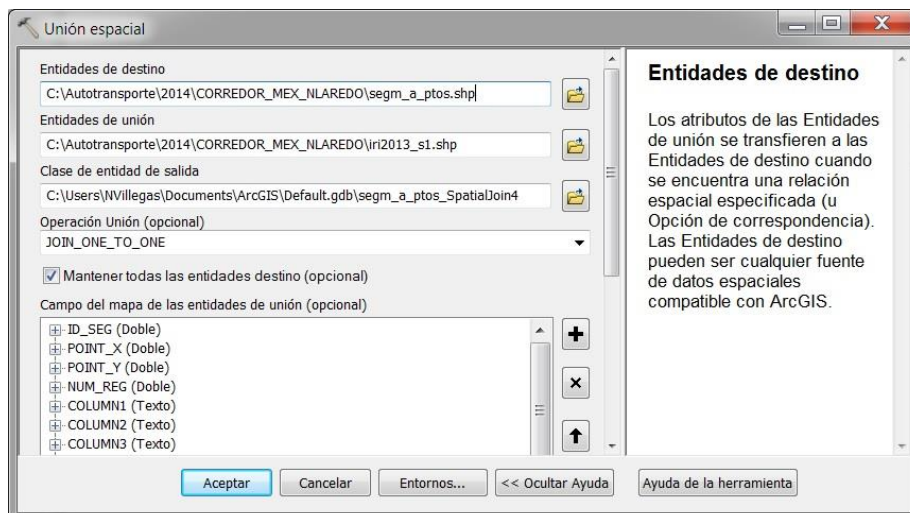


Figura 7. Unión espacial de IRI con nodos de los segmentos de 500 m

El resultado de la herramienta “Unión espacial” se exporta a un archivo tipo shape y se revisan y corrigen manualmente los nodos que no deben tener datos cuando el archivo espacial con IRI indica que no hay nodos cercanos al segmento. Finalmente, se convierte el archivo resultado a una tabla con extensión .dbf y con el algoritmo de programación filtra_iri.prg se obtiene el promedio de IRI registrado en los nodos de cada segmento de 500 m a fin de obtener el promedio por segmento.

Una vez que finaliza el proceso de vinculación de índices de accidentes viales, tránsito vehicular, velocidades de punto y estado superficial de la vía con los segmentos y tramos carreteros, es posible elaborar la representatividad de los datos espaciales y sus atributos.

Para el análisis espacial de estos datos el proceso de vinculación coadyuva para rastrear la localización de un segmento con determinadas características en sus atributos. El análisis de datos espaciales se refiere a aquellas ramas de análisis de datos en los que la referencia geográfica de los objetos contiene información importante (Goodchild y Haining, 2004).

5. REPRESENTATIVIDAD DE LOS DATOS DE ACCIDENTES DE TRÁNSITO

La representatividad de los datos espaciales del corredor longitudinal México-Nuevo Laredo fue realizada con el “software” ArcMap 10 y el uso de Google Maps para visualizar los segmentos de carreteras en un navegador de Internet.

5.1 Asignar simbología y crear archivo tipo kmz en ArcMap

Como primer paso, en ArcMap fue asignada una simbología a los segmentos de 500 m creados en el punto 3.3. El criterio para asignar a los segmentos un color por intervalos fue el siguiente: NAE entre 1 y 10 anaranjado; NAE entre 11 y 20 azul marino; y NAE > 20 rojo. La Figura 8 muestra el cuadro de diálogo con los parámetros agregados.

Posteriormente, se creó el archivo tipo kmz con la herramienta de ArcMap “Capa a kml”, como se muestra en el cuadro de diálogo de la Figura 9. Un archivo kmz es un archivo kml comprimido. El Lenguaje de Marcado Keyhole (KML, por sus siglas en inglés) es un formato basado en Lenguaje de Marcas Extensible (XML, por sus siglas en inglés) para almacenar datos geográficos y para compartirlos con personas que no utilizan SIG, además de ser un formato específico para visualizarse en Google Earth/Maps.

El resultado de la herramienta “capa a kml” es un archivo kmz. Para convertir un archivo con extensión kmz a un archivo kml, se debe cambiar la extensión del archivo kmz a zip y extraer el contenido.

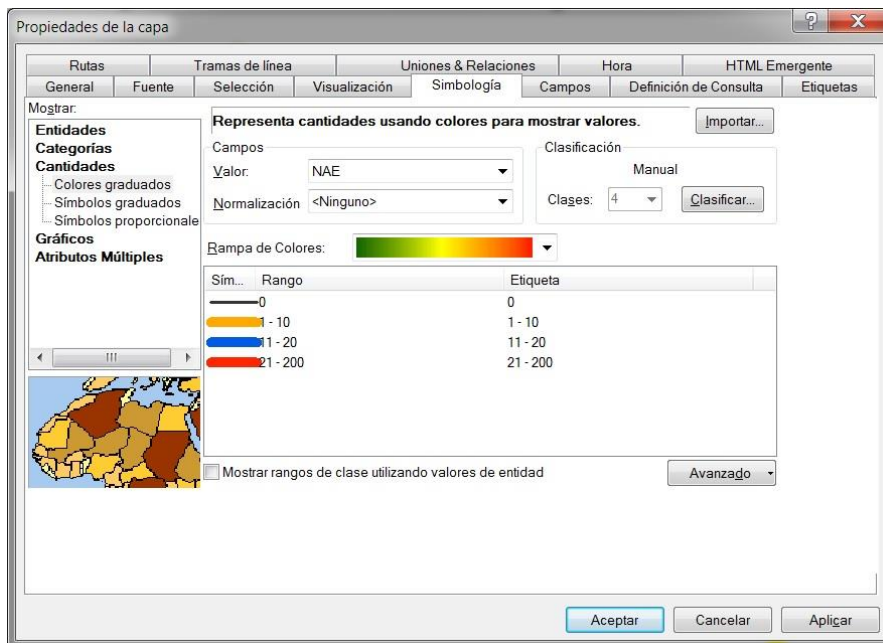


Figura 8. Asignación de simbología en líneas

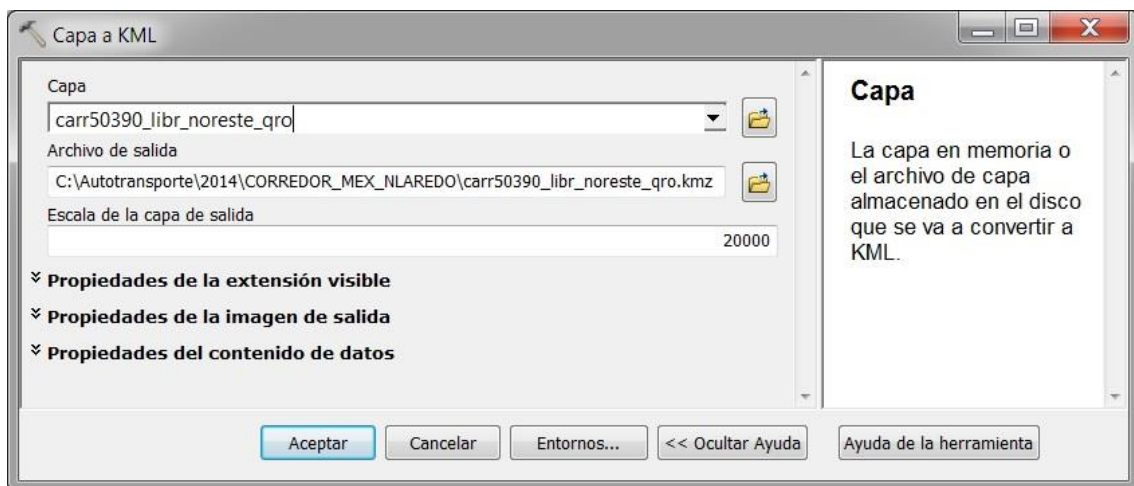


Figura 9. Creación del archivo tipo kmz

5.2 Representatividad de los datos espaciales con Google Maps

La representatividad de las carreteras segmentadas fue realizada en Google Maps. Primero, se crea un mapa con la función de mapas personalizados de Google Maps, para esto se selecciona la opción “Mis mapas” y luego “Crear un nuevo mapa”, después la opción “Importar” archivo kml, que corresponde al archivo creado en el punto anterior 5.1. Después de importar el archivo, se selecciona “compartir” de uso público y la opción “insertar en mi sitio” para acceder al URL abreviado del mapa y al código html. Al final, este código html fue utilizado en nuestro sitio Web.

Esta representatividad de datos espaciales facilita el análisis de datos para usuarios que no tienen “software” de SIG instalado en sus máquinas locales. Un gobierno o empresa grande podría hacer que la información de sus mapas esté disponible para que otras áreas o

departamentos no tengan que almacenar sus datos localmente (Mitchell, 2005).

Finalmente, la Figura 10 ilustra un ejemplo con el código html del Libramiento Noreste de Querétaro con representación de segmentos de acuerdo al índice NAE, cuya simbología fue descrita en el punto anterior. La Figura 11 ilustra el mismo Libramiento Noreste de Querétaro pero con un tipo de mapa diferente, además del recuadro que aparece al hacer clic en algún segmento de carretera, el cual contiene las características asignadas al segmento seleccionado. La Figura 12 ilustra el corredor longitudinal México-Nuevo Laredo, en México, clasificado, segmentado y con atributos asignados.

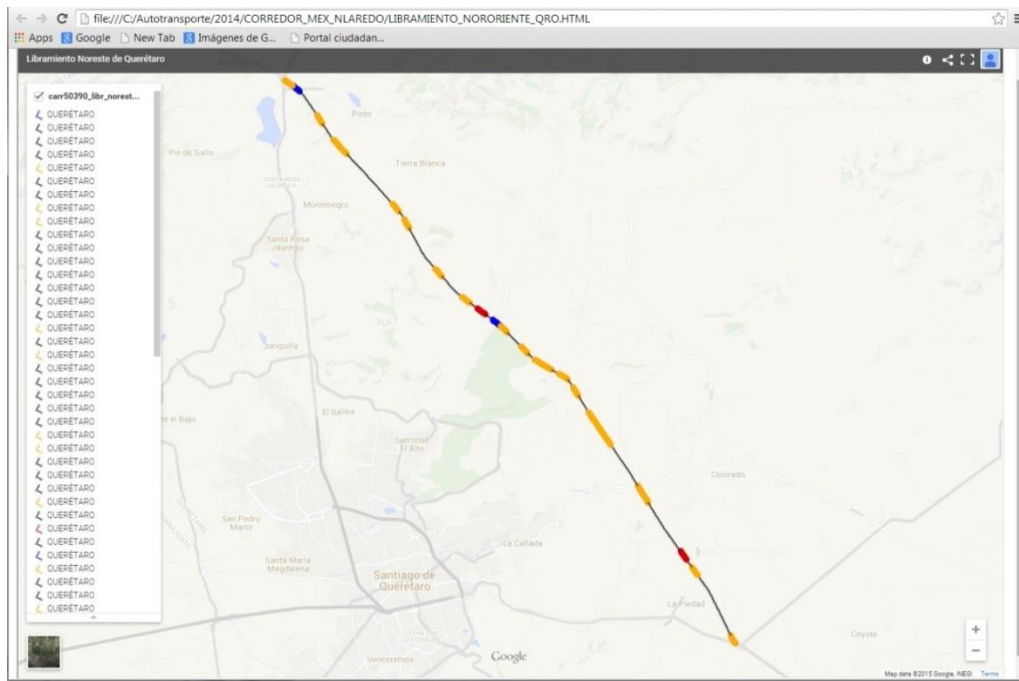


Figura 10. Representatividad de datos en el Libramiento Noreste de Querétaro

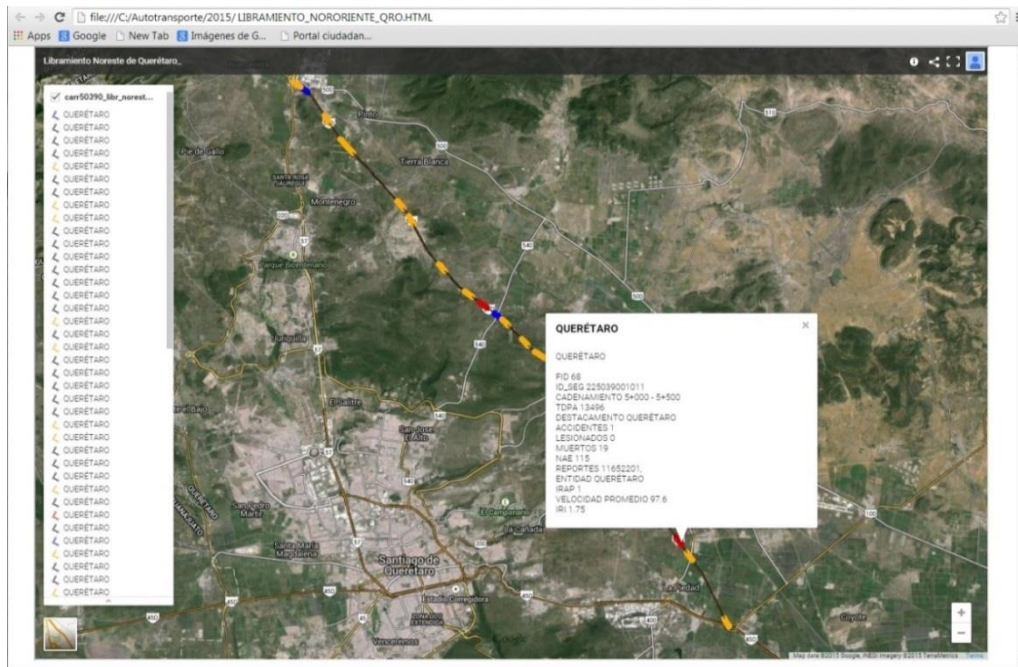


Figura 11. Representatividad de datos en el Libramiento Noreste de Querétaro

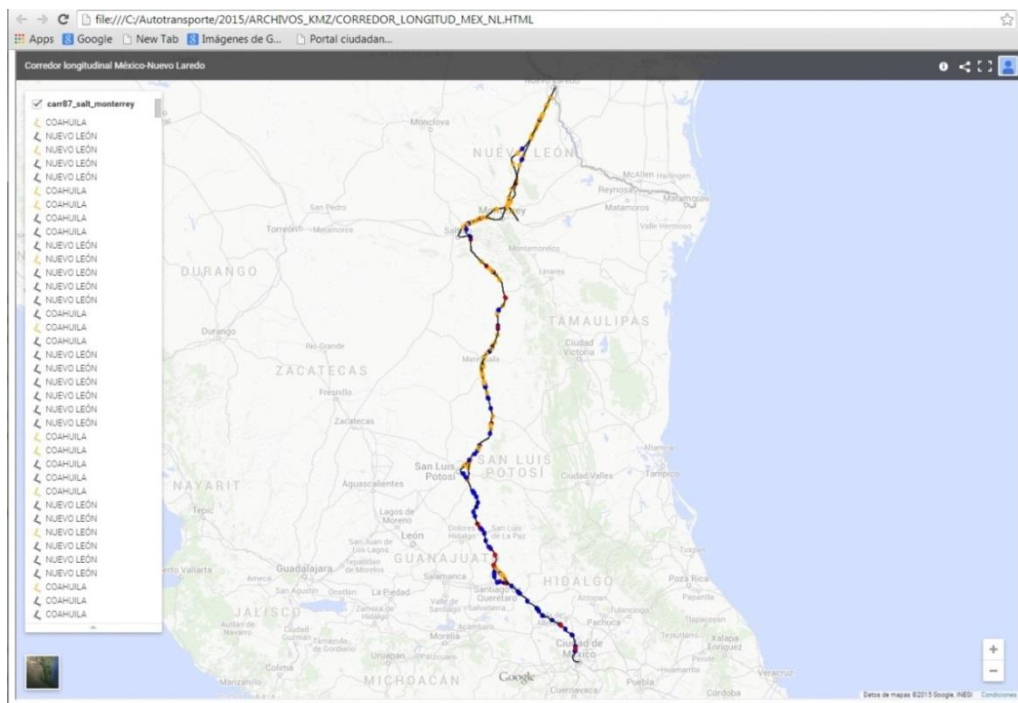


Figura 12. Representatividad de datos en el corredor longitudinal México-NL

Los beneficios principales de un modelo de red vial georreferenciado con carreteras clasificadas y en segmentos de 500 m son: 1) la obtención rápida de estadísticas de accidentalidad por segmento, tramo y carretera, a partir de la aplicación de algoritmos de programación que vinculan las bases de datos de accidentes viales con un segmento específico de la red, y posibilitan la actualización de datos año con año; 2) la representatividad de los datos de accidentes viales; 3) la estimación de los sobrecostos de operación vehicular, los cuales impactan de manera directa en los costos de productividad

del autotransporte; y 4) la obtención de una red con características y atributos para estudios de modelación de redes de transporte.

Los procedimientos con algoritmos de programación facilitan la automatización y obtención de resultados en menor tiempo, y la posibilidad de integrar datos de diversas fuentes, ya que es más difícil gestionar grandes volúmenes de información y vincular automáticamente estos datos con la red vial sin estos procedimientos y una infraestructura informática para su aplicación.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada con fondos de la Red Temática “Accidentes Viales” (Número 253411), como parte del programa de Redes Temáticas de Investigación 2015 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT).

REFERENCIAS

- ARCGIS 10. (2012). *Biblioteca de ayuda para el sistema de ArcGIS 10*. Disponible en: <http://help.arcgis.com/es/arcgisdesktop/10.0/help/index.html#/003900000026000000>
- ESRI. (1995). *Understanding GIS, The Arc/Info Method*. Version 7 for Unix and Open VMS.
- GOODCHILD, M.F. Y HAINING, R.P. (2004). *GIS and spatial data analysis: converging perspectives*. Papers in Regional Science, volume 83.
- MITCHELL, T. (2005). *Web Mapping, Using Open Source GIS Toolkits*. O’Reilly, USA, p. 213.
- PENG, Z-R. Y TSOU, M-H. (2003), *Internet GIS*. United States of America, John Wiley & Sons, INC, p. xxvi.
- SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES, SCT. (2014). *Datos Viales, Velocidades de punto*. Dirección General de Servicios Técnicos, México. Disponible en: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/datos-viales/2014/>
- VILLEGAS, N. (2011). *Sistema de Información Geográfica Distribuido para la detección de zonas de mayor índice de accidentes en Carreteras Federales*. pp. 32-36. Universidad Autónoma de Querétaro, México.

ÍNDICE DE AUTORES

A

Aceves García, Ricardo
355
Alarcón, Rodrigo 287
Alarcón Bernal, Zaida
Estefanía 355
Alarcon de Almeida Prado,
André 253
Alvarado Arias, Francisco
G. 65
Antún, Juan Pablo 287
Arango Serna, Martín
Darío 409
Araújo Coelho, Henrique
Eduardo 97, 651
Arbeláez Arenas, Oscar
127
Ávalos Bravo, Vladimir
877

B

Betanzo Quezada, Eduardo
427
Brasileiro de Freitas
Dourado, Anísio 921
Bulhões de Carvalho,
Eliezé 495
Buss Gonçalves, Mirian
381, 525, 561

C

Cabrera Vega, Félix Israel
587, 667
Camacho Palacios,
Gustavo 727
Cantillo, Víctor 617, 861
Carvalho de Gois, Tafarel
495
Cavalcante de Barros,
Bruna Renata 495
Cavalcante Rodrigues,
Evaldo Cesar 49, 201
Chávez Hernández, María
Victoria 33
Cifuentes Martínez, Sonia
Marcela 219

Coloma Miró, Juan
Francisco 473
Colón Torres, Enid 971
Colucci Ríos, Benjamín
971
Córdoba Maquilón, Jorge
Eliécer 127, 833, 847,
Cuevas Colunga, Ana
Cecilia 457, 791, 937

D

Da Penha Sanches, Suely
5, 159
Da Silva, Roberto
Bernardo 49, 201
Da Silva Feitoza,
Jaqueline 821
David Weber, Fernanda
269, 955
De Almada Garcia, Pauli
Adriano 17
De Almeida Guimarães,
Vanessa 17, 775
De Souza Silva, Laize
Andréa 81
Dexheimer, Letícia 955
Díaz, Carmelo J. 861
Dos Santos Senna, Luiz
Afonso 269, 679

E

Enríquez Santillán, Carlos
Adrián 369
Espejo Fandiño, Fredy
Leandro 709
Espejel García, Daphne
603
Espejel García, Vanessa
Verónica 603

F

Fares Gualda, Nicolau
Dionísio 253
Faria D'Avila, Rogério 97,
651
Flores De La Mota, Idalia
745

Fontes Lima Junior,
Orlando 381

G

Garcez Magalhães, Clóvis
679
García Alarcón, Adarenis
695
García Ferreira, Marcos
Antonio 5, 159
García García, Marta 473
García Gutiérrez, Javier
113
García Rosario, Ricardo
971
Garrido, Rodrigo A. 509
Gómez González, Nadia
903
Gómez Hernández, Alan
Alberto 323
González de la Rosa,
Manuel 113
Gonzales Taco, Pastor
Willy 145
Granados, Francisco
635
Guzmán, Alejandro 635

I

Ibeas, Ángel 509

J

Juárez Valencia, Lorenzo
Héctor 33

L

Larrañaga Uriate, Ana
Margarida 269
Leal Junior, Ilton Curty 17,
775
Legua Landeo, Gabriel
Sergio Luis 587
León, Alejandro 509
Leva, Mabel 509
Londoño, Gloria 177

López, Patricia 445
 Lozano Angélica 177,219,
 339,369,635
 Luiz Messias, Tiago 201

M

Magela Leite Junqueira,
 Geraldo 495
 Márquez, Luis 861
 Matsuo Shimoishi, José
 49, 201
 Mayoral Grajeda, Emilio
 Fco. 937
 Mendoza Díaz, Alberto
 457, 903, 1001
 Mesa López Colmenar,
 Juan A. 187
 Meyer Branski, Regina
 381
 Monteiro Lopes, Juliana
 775
 Mora Vargas, Jaime 543
 Mota Santiago, Luis
 Reynaldo 339
 Moura, José Luis 617
 Moura Araújo, Graziela
 495
 Moura Vieira, Caio 145

O

Obregón Biosca, Saúl A.
 427
 Oliveira de Andrade,
 Maurício 81
 Oliveira Feitosa, Zuleide
 145
 Ortega Riejós, Francisco
 A. 187
 Ortiz, Miguel A. 409

P

Pallavicini Fonseca,
 Adelaida 49
 Peñabaena Niebles, Rita
 617
 Pereira da Silva, Fátima
 991
 Pérez Castro, Jaime
 Guillermo 457, 791

Pérez Rodríguez, Daniel
 Alejandro 709
 Pina Moreira, Mauricio
 Renato 921
 Pinheiro da Rocha, Mário
 José 955
 Posada, Deisy Johana 833
 Posada Henao, John Jairo
 805
 Pozo Montaña, Miguel A.
 187
 Puerto Albandoz, Justo
 187

R

Ramírez Hurtado, Stefany
 891
 Regis, Fabiola 543
 Ríos Quezada, Gerardo
 791
 Rivas Cervera, Manuel 757
 Rivas Martínez, Omar 355
 Rocha Chiu, Luis Antonio
 757
 Rodrigues Caixêta,
 Wemerson 821
 Rojas Mejía, Nydia Lizeth
 323
 Romero Navarrete, José A.
 427
 Romero Torres, Javier 113
 Rondón Quintana, Hugo
 Alexander 847
 Ruiz, Ángel 543
 Ruiz Cruz, Bryan 971
 Ruiz Gonzalez, Johnathan
 971
 Ruiz Tiria, Yury Nathalia
 891

S

Sabino Gonzales, Manuel
 German 587
 Sánchez Hernández, Fredy
 305
 Sánchez Muñoz, Luis
 Alberto 805
 Sánchez Soliño, Antonio
 757

Saniger Alba, José
 Alejandro 603
 Santos Lima, Fabiana 525
 Santos Reyes, Jaime 877
 Sarmiento Ordosgoitia,
 Iván Reinaldo 127
 Saucedo Rojas, María
 Guadalupe 457
 Segura Pérez, Esther 237,
 305, 323, 393, 745
 Senior Arrieta, Vanessa
 833
 Serna Urán, Conrado
 Augusto 409
 Silva Barbosa, Alessandro
 201
 Souza, Juliano 561
 Souza, João Carlos 571

T

Tello Gaete, Daniel
 Alexander 323
 Teodoro, Pitias 775
 Toral Luna, Miguel Ángel
 427
 Torres Mendoza, Ricardo
 237

V

Valdés Díaz, Didier 971
 Varella, Leonardo 381,
 561
 Vargas Gonzaga, Miller
 José 775
 Vasconcelos Silva, Tharcia
 Suelen 495
 Vázquez Montes, Luis
 Enrique 393
 Villalobos Aragón,
 Alejandro 603
 Villarroel Dávalos,
 Ricardo 525
 Villegas Villegas, Noelia
 1001

W

Wellens, Ann Godelieve
 323

Wenglas Lara, Gilberto
603

Y
Yung Vargas, Yee Wan
847

