

Los ojos de

Yucatan

una ventana al mundo subterráneo



Editores:

Dra. Flor Árcega Cabrera
Dr. Pedro Agustín Robledo Ardila
Dra. Gabriela Rodríguez Fuentes
Dr. Juan José Durán Valsero

Los ojos de Yucatán
Una ventana al mundo subterráneo



Universidad Nacional Autónoma de México
Unidad de Química Sisal de la Facultad de Química (UQS-UNAM)
Instituto Geológico y Minero de España

Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Química

Geoquímica ambiental y contaminación

Los ojos de

Yucatán

una ventana al mundo subterráneo

Este libro se elaboró con el apoyo del proyecto PE200518 (PAPIME) de la Universidad Nacional Autónoma de México y bajo los términos del convenio 44777-1047-27-IV-16, realizado entre el Instituto Geológico y Minero de España y la Unidad de Química Sisal de la Facultad de Química, UNAM.

Dirección General de la Publicación:

Dra. Flor Árcega Cabrera

 <https://orcid.org/0000-0001-9794-833X>



Fotografías:

Agradecemos la colaboración de Fernando Rico (portada y contraportada), Neyra Silva (páginas 6 y 372), Benjamín Magaña Rodríguez, Paul Nicklen, H. Bahena, F. Álvarez, R. Cedeño, L.F. Martínez, Karla Ortega, Guillermo Pruneda y Corey Jaskolski.

Primera edición: 2021

Fecha de edición: 11 de diciembre de 2020

D.R. © 2021 UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Ciudad Universitaria, Alcaldía Coyoacán,

C.P. 04510, Ciudad de México.

ISBN: 978-607-30-4128-7

Tamaño 90.0 MB

Tipo de impresión: PDF

Tiraje: 1 (web)

“Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio, sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales”

Publicación autorizada por el Comité Editorial de la Facultad de Química.

Hecho en México

Contenido

Presentación.....	7
Capítulo 1..... Yucatán: unas reflexiones sobre los cenotes, la Geología y la investigación científica	13
Capítulo 2..... La península de Yucatán, una región entre dos mundos: superficial y subterráneo	21
Capítulo 3..... La génesis de los cenotes: entre lo terrestre y lo extraterrestre	37
Capítulo 4..... Las singularidades hidrogeológicas e hidrodinámicas del acuífero yucateco	75
Capítulo 5..... Distribución de las características morfológicas de las depresiones kársticas en el estado de Yucatán (México) a través de un reconocimiento semiautomático de su tipología	113
Capítulo 6..... Los ecosistemas acuáticos de la península de Yucatán	145
Capítulo 7..... Cosmovisión, pirámides y cenotes. Una exploración de la etnogeología maya desde la arqueología y antropología del turismo en la península de Yucatán	159
Capítulo 8..... Los cenotes y el geotursismo: una atracción geológica mundial	183
Capítulo 9..... Los cenotes como fuente de vida en la península de Yucatán: flora y fauna	201
Capítulo 10..... Peces de los cenotes de Yucatán	219
Capítulo 11..... Contaminación y su efecto en peces de cenotes de Yucatán	227
Capítulo 12..... Diagnóstico de contaminantes emergentes como fuentes de impacto en los ecosistemas acuáticos subterráneos del acuífero de Yucatán	247
Capítulo 13..... Contaminación del agua en el Anillo de Cenotes: escenario sociocultural, ambiental y político	259
Capítulo 14..... El agua subterránea y los procesos de contaminación: revisión normativa federal y del estado de Yucatán	275
Capítulo 15..... Avances en la legislación para la protección de cenotes	291
Capítulo 16..... El lado oscuro del universo maya	309
Bibliografía.....	337
Autores.....	373



Presentación

Una de las primeras personas con las que platicué largamente, ya en el cargo de Secretaria de Desarrollo Sustentable del gobierno de Yucatán, fue con la Dra. Flor Árcega; una investigadora comprometida con la calidad del agua en el acuífero de Yucatán y, claro está, entusiasta de compartir con la recién llegada y nueva funcionaria todo el trabajo y esfuerzo científico relacionado con dicha cuestión. De esta larga conversación, resultaron nuevas formas de entendimiento del tema por mi parte, así como nuevos compromisos de trabajo en conjunto con la academia y más entusiasmo en seguir conociendo y trabajando al respecto; pero sobre todo, hay una frase de esa charla que no se me olvida, y es que, al hablar de mi interés en trabajar en los cenotes de Yucatán, Flor exclamó: “Los cenotes son los ojos de nuestro acuífero, son los ojos de Yucatán”.

Los ojos de Yucatán. Una ventana al mundo subterráneo, la considero una obra con un esfuerzo genuino, no sólo de la Dra. Árcega, sino de todos y cada uno de los investigadores y colaboradores de este libro, para poner al alcance de los lectores todo lo que se ha investigado, estudiado y que hoy sabemos sobre este inmenso, increíble y fascinante mundo subterráneo de la península de Yucatán; así como sembrar la curiosidad e interés de seguir investigando y estudiando los *d'zonot*.

Aquél que se atreva a explorar esta obra descubrirá que muchos temas convergen en estas maravillas de la Geología, desde la clara explicación de su génesis, hasta la descripción y funcionamiento de la hidrogeología e hidrodinámica del sistema kárstico de la península de Yucatán, con sus particularidades. Explica y describe claramente la importancia de la identificación e investigación de los cenotes como ecosistemas, su funcionamiento e interrelación, así como la abundancia en la riqueza de su flora y fauna asociadas. Por otra parte, también nos describe el esfuerzo extenso y diverso en la investigación al respecto del dimensionamiento de la contaminación, sus fuentes y oportunidades de identificación, cuantificación y control de las mismas; por supuesto, nos hace reflexionar en las diversas aproximaciones para la implementación de una gestión y administración de estos recursos, y también del estado de la regulación normativa de las aguas y cuerpos kársticos. Finalmente, nos comparte un análisis antropológico e histórico de su relevancia en la cultura maya. Estos muchos y variados temas apuntalan a descubrir no sólo la riqueza que tenemos en nuestros pies, sino también las áreas de trabajo a seguir y coordinar entre las diversas disciplinas.

En la obra se recalca, a lo largo de su lectura, la verdad de que en “estos sitios yace también, en un inesperado excelente estado de preservación, una enorme riqueza cultural y paleontológica”; por lo tanto, vale la pena leer al respecto, conocerlos, valorarlos, investigar sobre ellos y, sobre todo, comprometernos al cuidado y preservación de ***Los ojos de Yucatán***.

Sayda Rodríguez Gómez

La Química es la ciencia central, nos gusta decir a los científicos, porque la Química está en medio de la lista de las ciencias, con las Matemáticas, la Astronomía y la Física (las ciencias físicas), de un lado y, del otro, la Biología, la Fisiología y la Medicina (las ciencias de la vida). Adicionalmente, en otra escala, la Química atiende directamente a la Ingeniería, la Farmacia y, de nuevo, a la Medicina, en el lado de las ciencias aplicadas.

La Química es la ciencia central, aprendemos a decir los directores de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, porque la diversidad de temas, estudios y aplicaciones que han encontrado los colegas que desarrollan investigación en esta dependencia lo confirman todos los días. Un notable ejemplo de esta diversidad y de la centralidad de nuestras especialidades es este libro.

El agua es uno de los cuatro elementos reconocidos por la mayor Antigüedad. Su centralidad e importancia en el estudio de las ciencias físicas y de las ciencias de la vida abarca la historia completa de las ciencias, de la misma manera en que el agua abarca cualquier estudio de la actualidad. Con la importante adición, en el presente, de los estudios sociales y económicos que pronostican importantes modificaciones de su manejo y su disponibilidad en el futuro cercano.

La península de Yucatán tiene, por naturaleza, un sistema hídrico casi único en el planeta. Su composición física está presente sólo en dos o tres regiones adicionales en el mundo. Su historia geológica la vuelve única porque la caída de meteoritos gigantes en las costas de un sistema hídrico tan singular ha ocurrido sólo una vez. El estudio cabal y moderno de este sistema hídrico es imperativo.

Así, la Química combina los saberes requeridos para estudiar globalmente el tema del agua que presenta situaciones, retos y oportunidades de conocimiento especiales en la península de Yucatán. Con la Química como centro, los editores de este libro acometieron exactamente esa tarea y nos presentan sus resultados en este magnífico volumen. Adecuadamente, han buscado la colaboración de científicos en todas las especialidades mencionadas, logrando así un trabajo multidisciplinario que cubre la lista completa de las ciencias. En la lectura de este libro, quedará clara la excepcionalidad de las características del sistema hídrico de esta península y su singularidad geológica. También serán evidentes sus características físicas: su tamaño, su movimiento, su velocidad de flujo, su ciclo y sus peculiaridades que lo han hecho sustentable en el pasado, y leeremos la interpretación de cómo hemos modificado este ciclo y cómo podemos, quizá, mantenerlo sustentable.

El libro tiene otra característica destacable: la multidisciplina que lo define también se nota en la diversidad del público que puede encontrar cómo disfrutarlo. Algunos detalles de los textos requieren alta especialización y son relevantes para los versados en el tema. Otros, ilustrarán y atraerán la atención de científicos de otras disciplinas y otras especialidades, pero no están ausentes los párrafos que estimularán la curiosidad de lectores que no se habían topado previamente con los temas que se tratan: el sistema hídrico de la península es singular y apasionante, su estudio requiere de la multidisciplina centrada en la Química y los autores presentan en este libro la información que se requiere para estimular la curiosidad de quien dedique su tiempo a leerlo.

Carlos Amador Bedolla

El presente libro es un paso más en la estrecha relación entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) e Iberoamérica, entre México y España, a través de los diferentes estamentos que han aportado de manera directa o indirecta su esfuerzo, para que hoy este manuscrito sea una realidad. Es de justicia destacar que este hito viene precedido por la firma del Convenio Marco de Colaboración en 2017 entre el IGME y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), que dio cuerpo administrativo y determinó los objetivos comunes de esta importante iniciativa. Gracias a este impulso, promovido por miembros y unidades de ambas instituciones, la continuidad y permeabilidad del trabajo conjunto dio como fruto la colaboración y el compromiso activo y sincero del Gobierno del Estado de Yucatán, a través de la Secretaría de Desarrollo Sustentable; así también, el trabajo realizado durante estos años para dinamizar las relaciones con otros organismos queda reflejado en los diferentes capítulos que componen esta obra.

Esta publicación recoge un antes y un después en la relación histórica entre el IGME y la UNAM, bajo el paraguas del estrecho vínculo iberoamericano. La península de Yucatán es un referente en la investigación científica del karst y la conservación de la naturaleza en México. Este libro nos acerca a una realidad que pone de manifiesto muchos aspectos que giran en torno a los conocidos mundialmente cenotes que, como se desarrolla en algunos de sus capítulos, son uno de los pilares socioeconómicos de la península de Yucatán. Esta obra articula una magistral visión multidisciplinar de la investigación al respecto, donde se integra lo biótico y lo abiótico, lo inerte y lo dinámico, el pasado, el presente y el futuro de una sociedad ligada a estas estructuras geológicas, tanto o más de lo que estuvo a sus conocidas pirámides. No pasan desapercibidos los capítulos enfocados a la arqueología maya y su estrecha relación con el agua subterránea, como recurso estratégico o como parte de su identidad cultural. Tampoco puedo olvidar aquellos capítulos que explican rigurosamente la relación entre la sociedad y su derecho a disponer de agua en condiciones de salubridad óptimas, o que fauna y flora dependen de la conservación de los cenotes como núcleos de la sostenibilidad de los ecosistemas en esta región. Como bien expone el título del libro o algún capítulo, los cenotes son la ventana al que es probablemente el mayor acuífero kárstico y uno de los laboratorios naturales más importantes del planeta.

Por todo ello, esta publicación pretende ser un espejo de cómo la colaboración entre dos países puede integrar la investigación científica y técnica con la sociedad y su cultura, a través de una obra de divulgación científica, con una abundante documentación gráfica que da luz a una de las zonas más emblemáticas del mundo. Cabe decir que es un texto magníficamente ilustrado, donde también se pone de relieve la necesidad de articular protocolos y figuras de conservación y protección del patrimonio natural y cultural en general, que permita por tanto una gestión integral que también deberá superar las propias fronteras geopolíticas del territorio yucateco.

Como Directora del IGME, es un honor y un privilegio firmar un prólogo de una obra de estas características que, con toda seguridad, aprovecharán y disfrutarán los lectores, y en la que podrán descubrir el impresionante universo ambiental, hidrogeológico y geológico de la península de Yucatán.

Ana María Alonso Zarza



Sayda Rodríguez Gómez

Es Licenciada en Administración de Recursos Naturales de formación por la Universidad Marista de Mérida. En 2005, obtuvo el grado de Maestra en Ingeniería Ambiental por la Universidad Autónoma de Yucatán.

Es especialista en el manejo integral de residuos y en gestión ambiental; cuenta con amplia experiencia en el sector privado, donde se ha desempeñado en la gestión y asesoría ambiental para empresas privadas, formando parte de una consultoría ambiental.

En el ámbito académico, fue docente durante ocho años y ha implementado programas de gestión ambiental para la Universidad Marista de Mérida.

Durante el período 2015-2018, fungió como Directora de la Unidad de Desarrollo Sustentable del Ayuntamiento de Mérida.

Actualmente, es titular de la Secretaría de Desarrollo Sustentable del Gobierno del Estado de Yucatán, siendo la primera mujer en ocupar este cargo en la historia de la Secretaría.

Carlos Amador Bedolla

Es Director de la Facultad de Química de la UNAM y profesor titular de Química Teórica. Estudió la licenciatura en Química y la maestría y el doctorado en Fisicoquímica en esa misma institución. Ha realizado estancias posdoctorales y sabáticas en Cleveland, Berkeley, Santiago de Cuba y Harvard. Ha publicado decenas de artículos de investigación, decenas de artículos de difusión, un programa de televisión y dos libros: *La huelga del fin del mundo* (Planeta, 2000) sobre política universitaria y *El mundo finito: desarrollo sustentable en el siglo de oro de la humanidad* (Fondo de Cultura Económica, 2010) sobre temas de sustentabilidad. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores con el nivel II.



Su experiencia docente incluye 40 materias distintas en más de 135 cursos. Los temas de esas materias cubren los diversos niveles de licenciatura y del posgrado. Ha dirigido cerca de 30 tesis en los niveles de licenciatura, maestría y doctorado. Es invitado frecuente a impartir conferencias sobre los temas de su investigación —el empleo de la Química Teórica en el diseño de materiales con aplicaciones energéticas— y sobre temas de energía y cambio climático.

Ha dirigido proyectos de investigación multidisciplinaria sobre celdas fotovoltaicas orgánicas. Actualmente, participa en el proyecto de almacenamiento de energía en baterías de flujo y celdas de combustible, en colaboración con siete instituciones nacionales.



Ana María Alonso Zarza

Directora del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), desde septiembre de 2020. Catedrática del Departamento de Mineralogía y Petrología de la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Complutense de Madrid (UCM), desde 2012, e investigadora del Instituto de Geociencias (IGEO), centro mixto UCM-CSIC (Consejo Superior de Investigaciones Científicas).

Walther Medal 2016 de la Asociación Internacional de Sedimentología como reconocimiento a sus contribuciones relevantes en dicho campo.

Presidenta de la Sociedad Geológica de España (2016 a 2020) y, como tal, coordinadora nacional de *Geología*, labor de divulgación que llega a más de 10 mil personas anualmente, dirigida por más de 600 docentes e investigadores.

Su investigación se ha centrado de forma prioritaria en el estudio de depósitos continentales, sobre todo carbonatos. Dirigió cinco proyectos del Plan Nacional y ha participado en más de 20. Ha sido docente en diferentes asignaturas de licenciatura y grado en Ciencias Geológicas, y en Ingeniería Geológica, así como de Máster y Doctorado. Entre los cursos impartidos está el de especialista sobre Carbonatos Continentales en la Universidad de Buenos Aires y en la Universidad Católica de Chile; fue nombrada *Courtesy Research Associate* y *Visiting Professor*, respectivamente, en sus estancias en Estados Unidos y Canadá.



El cenote Dzonot-Illá, ubicado en el municipio de Abalá, se caracteriza por estar muy adornado con estalactitas bandera de más de 2 metros de altura.¹

¹ Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez, quien narra su experiencia: “Como todo biólogo, el mundo y sus enigmas han sido mi fuente de fascinación. El hecho de sumergirme en lo profundo de nuestro planeta y mostrarlo a través de la fotografía, me ha llevado a dedicar estos últimos seis años de mis labores fotográficas a capturar los misterios que atesoran los cenotes. Aquí, comparto algunas fotografías que he tomado en cenotes del estado de Yucatán y Quintana Roo, con la finalidad de que el observador pueda apreciar las maravillas que nos ofrece el acuífero de la península de Yucatán”.



Capítulo 1

Yucatán: unas reflexiones sobre los cenotes, la Geología y la investigación científica

Juan José Durán Valsero
Pedro A. Robledo Ardila

Instituto Geológico y Minero de España (IGME)



Introducción

La península de Yucatán es un lugar excepcional desde el punto de vista geológico. Posiblemente se trata de uno de los afloramientos de rocas carbonáticas tabulares más extensos del planeta (unos 125000 km²), que constituyen el acuífero kárstico más importante existente. La presencia en la superficie exokárstica de más de 10000 dolinas de colapso, denominadas localmente *cenotes*, otorgan un carácter muy particular al paisaje. Por debajo de la superficie, cientos (quizás miles) de kilómetros de galerías albergan cursos de agua subterránea, que conectan el acuífero kárstico de aguas dulces con las saladas del mar, generándose interfaces complejas entre ambos tipos de agua de salinidad y densidad diferentes.

Las variaciones del nivel del mar de los últimos millones de años y la dinámica kárstica han posibilitado la existencia de numerosas generaciones de espeleotemas sumergidos, ofreciendo paisajes subacuáticos espectaculares.

El origen de los cenotes, algunos de los cuales se distribuyen en una geometría particular, denominada *Anillo* o *Cinturón de Cenotes*, y la jerarquización y arquitectura de las redes sumergidas subterráneas, varias de ellas con cientos de kilómetros de longitud, son líneas de investigación científica abiertas todavía a debate.

La necesidad de protección de uno de los lugares kársticos más emblemáticos del planeta es otro de los aspectos que se ofrecen como retos futuros. Aunque en la península de Yucatán están protegidos algunos sectores naturales y culturales como Patrimonio de la Humanidad o Reserva de la Biosfera, se hace necesaria en un futuro inmediato la declaración de un Geoparque Mundial para realzar el conjunto de sus valores geológicos.

La conservación de la calidad de sus aguas subterráneas ante las múltiples presiones como el turismo, la agricultura y la ganadería, o las diversas industrias potencialmente contaminantes, es otro de los frentes abiertos que se deben resolver para garantizar la supervivencia de uno de los mayores ecosistemas subterráneos de agua dulce del mundo, equiparable en cuanto a su grandeza, espectacularidad y potencial de investigación a la Amazonia o a la Antártida, presentando también retos y dificultades de exploración e investigación equivalentes.

La península de Yucatán, el modelo ideal de karst del tipo "cama"

Los acuíferos kársticos muestran, básicamente, dos tipologías muy diferentes: los que presentan un relieve positivo importante (sierras, cadenas montañosas), con zonas no saturadas de gran espesor y estructuras geológicas complejas (pliegues, fallas y cabalgamientos) y los que conforman grandes y extensos relieves tabulares, con espesores moderados (cientos de metros como máximo), zonas no

saturadas poco potentes y arquitecturas geológicas sencillas, sin deformaciones importantes. Los primeros son considerados de tipo "armario", donde la circulación vertical prima sobre la horizontal y existen diferencias piezométricas muy notables entre las zonas de recarga y las de descarga.

Ejemplos destacados son los numerosos macizos kársticos de las Cordilleras Alpinas Perimediterráneas, como los Picos de Europa, en el norte de España o el Cáucaso, en Georgia, donde las cavidades subverticales o simas alcanzan más de mil metros de profundidad y algunas pueden alcanzar e incluso superar los 2 km.

Los segundos son los acuíferos de tipo "cama", con dimensiones relativas más importantes hacia las dos dimensiones planares con relación a la tercera dimensión, la profundidad. La circulación subterránea predominante es horizontal y las diferencias piezométricas son muy pequeñas, entrando en juego con frecuencia otros factores, por ejemplo, la relación de densidades entre cuerpos de agua de diferentes salinidades. En estos macizos kársticos, los grandes sistemas subterráneos son subhorizontales, con desarrollos que pueden superar los centenares de kilómetros de longitud acumulada.

Existen varios ejemplos importantes en el planeta de este segundo tipo de acuíferos kársticos, como pueden ser las planicies de Nullarbor en el sur de Australia o los karsts de Florida y Nuevo México en Estados Unidos, bien descritos y con un desarrollo de formas endokársticas muy importante.

Sin embargo, posiblemente el lugar donde concurren todas y cada una de las circunstancias para ser considerado el modelo por antonomasia de este tipo de acuíferos kársticos es la península de Yucatán, entre el Golfo de México y el Caribe.

¿Una circulación subterránea entre dos mares?

Algunos autores plantean la posibilidad de una conexión hidrogeológica entre los dos mares que bañan a la península de Yucatán, el Golfo de México al oeste y el Caribe, al este. Debido a que el Mar Caribe presenta una mayor elevación que el Golfo de México y al hecho de que la plataforma carbonatada de Yucatán sea asimétrica (más vertical y profunda al este y más suave y tendida al oeste, con mayor continuidad bajo el mar), se ha postulado un posible flujo subterráneo de agua marina, de este a oeste, por debajo de la gran lente de agua dulce subterránea del acuífero de Yucatán.

La realidad es que se ha constatado la existencia de agua salada por debajo del agua dulce más superficial, en puntos situados a más de 100 kilómetros de la actual línea de la costa, en el estado de Yucatán, confirmando la presencia de flujos de agua marina de gran longitud.

El controvertido origen del Anillo de Cenotes

La distribución geológica, el número y el origen de los distintos tipos de cenotes son, aún hoy en día, insuficientemente conocidos. No obstante, las nuevas técnicas de detección automática de depresiones han permitido realizar una cartografía de cenotes que puede considerarse bastante aproximada a la realidad. Este mapa de cenotes indica una distribución muy diferente a lo que se creía hasta la actualidad, siendo mucho más amplia de lo que se pensaba. Incluso la propia definición geométrica del conocido Anillo de Cenotes podía verse desdibujada y, en consecuencia, su origen (en lo relativo a su relación directa con el cráter meteorítico de Chicxulub) también se podría poner en entredicho.

Lo que sí parece cierto es que existe un tipo de cenote predominante en el sector del Anillo. Son los cenotes de tipo "pozo", con morfología cilíndrica y desarrollo importante en sentido vertical, especialmente abundantes en este sector. Quizás estudios más detallados del origen de estos cenotes y su posible relación con la arquitectura estratigráfica de la plataforma pueden arrojar algo más de luz en el futuro, sobre la génesis de esta peculiar estructura.

El papel de la espeleogénesis profunda

En la actualidad, en todo el planeta, aparecen cada día más cavidades kársticas cuyo origen se atribuye a fenómenos hipogénicos, por contraposición a la clásica karstificación epigénica, de origen meteórico. También en la península de Yucatán se han encontrado posibles indicios de este tipo de fenómenos, que pudieran contribuir a explicar algunas peculiaridades del karst yucateco.

Por ejemplo, en algunos cenotes se han encontrado aportes de aguas sulfurosas, que pueden ser indicativos de hiperkarstificación por ácido sulfúrico, procedente de la oxidación de sulfuros presentes en las rocas calizas. Algunos autores sugieren este mecanismo para la génesis de los cenotes de tipo "pozo", generados de abajo hacia arriba por flujos de aguas ascendentes, con características hidroquímicas diferentes a las habituales del acuífero yucateco.

La organización y arquitectura del endokarst

La península de Yucatán es una plataforma carbonática con una morfología superficial, posiblemente única en el planeta, pero también con una estructura subterránea de extraordinaria complejidad.

A grandes rasgos, existe una determinada distribución geométrica de los sistemas endokársticos en la península. Las grandes redes de cavidades parciales o totalmente sumergidas se sitúan en la cercanía de las líneas de costa. Son las cuevas de tipo *flank-margin caves* (cuevas de margen de flanco o cuevas litorales), en las que el papel de la mezcla de aguas dulces y saladas en torno a la haloclina es

fundamental para la karstificación. Estos sistemas endokársticos se han generado en los últimos cientos de miles de años en torno a los diferentes niveles del mar, que han sufrido modificaciones superiores a los 120 m.

Yucatán presenta los sistemas endokársticos sumergidos de mayor desarrollo del mundo, como el sistema Sac Antún, con 347 km de longitud, aunque posiblemente la realidad sea aún más compleja, con laberintos de miles de kilómetros de longitud.

En las zonas más lejanas de la costa, a decenas o centenares de kilómetros, el endokarst se estructura en torno a los cenotes que constituyen, en muchas ocasiones, los únicos accesos a otro tipo de sistemas horizontales totalmente sumergidos, aunque por lo general, con desarrollos mucho menores que los conocidos y explorados hasta ahora en la cercanía de la línea de costa.

Los registros paleoambientales y eustáticos

Una de las líneas de investigación más prometedoras en Yucatán es el establecimiento de curvas de evolución paleoambiental y de oscilaciones del nivel del mar durante el Cuaternario. La presencia de grandes sistemas endokársticos multiniveles relacionados con las diferentes estabilizaciones del nivel del mar, combinada con las distintas generaciones de espeleotemas (muchas de ellas actualmente sumergidas), proporcionan unos registros de gran valor para el estudio detallado de las condiciones climáticas pasadas.

Pero no solamente plantean interés las variaciones climáticas de hace cientos o decenas de miles de años antes de la actualidad. Mucho más recientemente, se ha podido determinar en Yucatán la existencia de períodos secos históricos, mediante el estudio detallado de espeleotemas (con dataciones absolutas y análisis de los isótopos estables del carbono y del oxígeno), que han condicionado el devenir de algunas de las grandes civilizaciones que vivieron en la península, como los mayas. La estrecha relación de los pobladores yucatecos de todas las épocas con el medio natural está escrita en los registros sedimentarios endokársticos y su lectura puede ayudar a entender mejor el futuro que les depara el actual cambio global.

Reflexiones finales: la necesidad de reconocimiento nacional e internacional

Yucatán es un territorio plurinacional con una gran cantidad de espacios protegidos, tanto por los tres países que comparten soberanía, como mediante figuras de ámbito internacional.

Existen numerosas Reservas de la Biosfera declaradas por la UNESCO, sobre todo en México (Ría Celestún, Ría Lagartos, Calakmul, Sian Ka'an y Montes Azules) y Guatemala (Chiquibul-Montañas Maya), así como

algunos destacados enclaves arqueológicos declarados Patrimonio de la Humanidad: Ciudad Prehispánica de Chichén Itzá y Población Prehispánica de Uxmal, ambas en México; y Parque Nacional de Tikal, de carácter mixto, natural y cultural, en Guatemala. En Belice, el Parque Nacional Chiquibul en la continuación natural de la Reserva de la Biosfera maya guatemalteca.

No obstante, pese a lo indicado anteriormente, la península no goza de un reconocimiento integral de ámbito internacional. Eso es así pese a que su conservación se enfrenta a retos muy importantes, el primero de ellos es la gestión compartida entre tres países de un extenso territorio de 125000 km². Además, las crecientes presiones de todo tipo a las que se ve sometido el territorio (el incremento del turismo, la agricultura, la ganadería o algunas industrias con gran potencial de contaminación de las aguas subterráneas) amenazan el bienestar social y la conservación del patrimonio geológico y biológico. El turismo geológico o geoturismo es uno de los sectores con mayor potencialidad en Yucatán, junto con el turismo cultural ligado a grandes zonas arqueológicas.

Por ello, parece importante y urgente considerar la posibilidad de establecer una figura global de gestión que, sin comprometer el desarrollo socioeconómico de la población, permita una visión conjunta de las potencialidades y de los problemas de la península yucateca, así como que asegure la conservación de sus extraordinarios valores geológicos de base.

Posiblemente esta figura no sea otra que la de Geoparque mundial de la UNESCO, cuya declaración permitiría, además de ser un ejemplo de cooperación internacional, potenciar la investigación científica, tan necesaria para la comprensión de los extraordinarios procesos que se desarrollan en Yucatán, asegurando su conservación. Las líneas de trabajo científico y los retos que se plantean en la actualidad son de tal calibre que bien pueden ser comparados con los existentes en otras grandes áreas aún poco conocidas del planeta, como los fondos oceánicos, la Amazonia o el continente antártico, todos ellos auténticos laboratorios naturales a escala global.



Cenote Muldzonot, ubicado al oriente del estado de Yucatán. Buzo: Erick Sosa. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.



*Cenote Xbaba, ubicado en la región de Chocholá, Yucatán. En la parte abierta del cenote hay un manchón de nenúfares (*Nymphaea sp.*). Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Capítulo 2

La península de Yucatán, una región entre dos mundos: superficial y subterráneo

Elizabeth Lamas Cosío,¹ Ismael Ocegüera Vargas,¹ Alberto Sosa,²

Iñaki Vadillo Pérez,³ Flor Árcega Cabrera¹



¹Unidad de Química-Sisal, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

²Facultad de Ciencias, Unidad Académica de Yucatán, UNAM

³Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga



Introducción

México es un país con una amplia diversidad geográfica, cultural, geológica y biológica. Abarca una extensión territorial de 1964 millones de kilómetros cuadrados, de los cuales, 1959 millones km² son superficie continental y 5127 km² son superficie insular. A este territorio debe añadirse la Zona Económica Exclusiva de mar territorial, que abarca 3149 millones km², por lo que la superficie total del país es de 5120 millones km² (INEGI, 2018).

El país se divide en 15 provincias fisiográficas que cuentan con características geológicas, climatológicas e hidrológicas similares. Dentro de esta división fisiográfica, se encuentra la provincia de la península de Yucatán, la cual constituye una plataforma de rocas carbonatadas cuya altitud promedio es de 50 metros sobre el nivel del mar (msnm), siendo la menor de todas las del país. La provincia de la península de Yucatán está integrada por los estados de Yucatán, Quintana Roo y Campeche (INEGI, 2008), que a su vez se compone de tres subprovincias (**Figura 1**).

Figura 1. Mapa de las subprovincias fisiográficas de la provincia de la península de Yucatán.



Marco geográfico de la península de Yucatán

El término península (vocablo derivado del latín *paeninsula*) hace referencia al fragmento de tierra que está rodeado por agua y se conecta con otra tierra de extensión más importante a través de una porción de superficie que es relativamente estrecha. Puede decirse, por lo tanto, que una península es toda porción de territorio limitada por el mar con la excepción del área donde se conecta con un territorio de mayor magnitud.

La península de Yucatán corresponde a la parte que emerge de la plataforma continental de Yucatán, la cual abarca una extensión de 300000 km² y separa al Mar Caribe del Golfo de México. Los rasgos orogénicos (formación de montañas) están prácticamente ausentes debido a que es una plataforma estable de rocas sedimentarias

cenozoicas en posición sensiblemente horizontal, sin perturbación orogénica importante. El 90% de su superficie está a menos de 200 msnm y la Sierrita de Ticul es la única elevación prominente (Beddows *et al.*, 2008).

La geología de la península de Yucatán está conformada por depósitos de piedra caliza altamente permeables, que en su conjunto pertenecen a un sistema kárstico (Smart, 2006), en el cual se ha integrado una enorme red cavernosa subterránea por la que escurre el agua, en general hacia el norte, lo que explica la carencia de ríos (INEGI, 2009). Los flujos de agua horizontales se mueven en diferentes direcciones a través del subsuelo de la península y siempre con destino final en la costa (Figura 2), presentándose descargas tanto en forma difusa a través de fracturas de la roca o puntuales a través de manantiales submarinos (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).

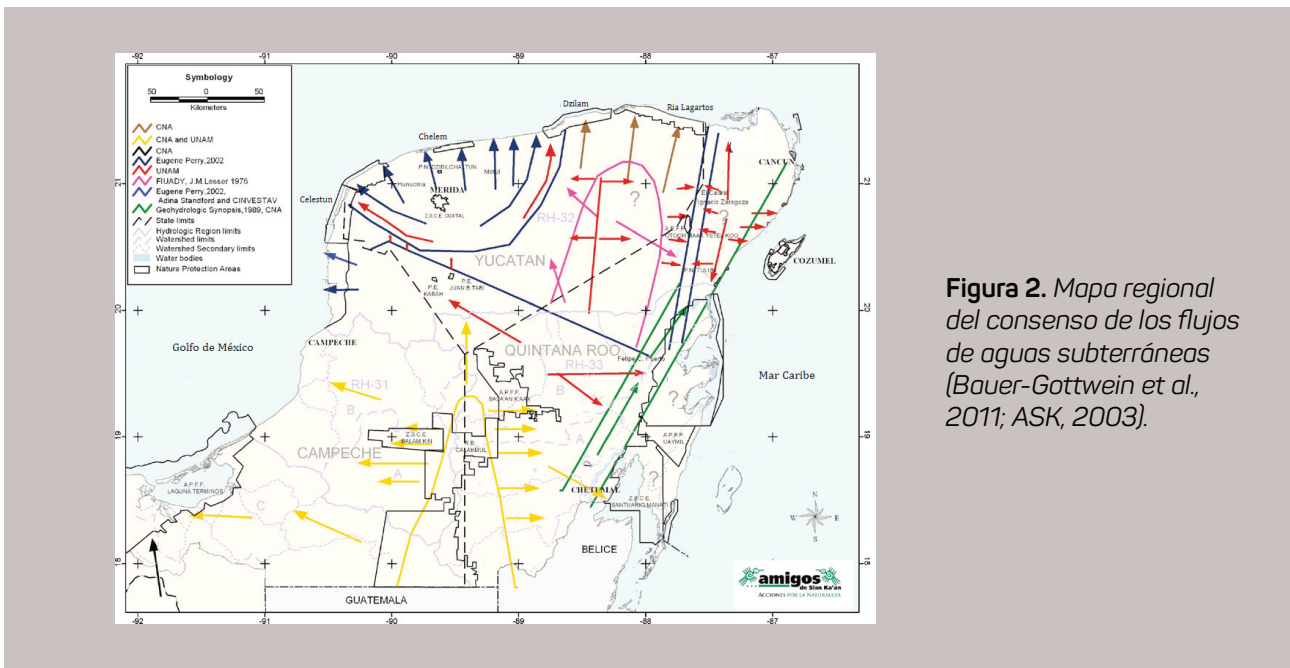


Figura 2. Mapa regional del consenso de los flujos de aguas subterráneas (Bauer-Gottwein *et al.*, 2011; ASK, 2003).

El estado de Yucatán: fisiografía y clima

El estado de Yucatán cuenta con una superficie de 43379 km², lo que constituye el 2.21% de la superficie total de todo el país. Cuenta con 340 km de costa, lo que representa el 3.1% del total nacional.

Yucatán presenta la forma de un triángulo irregular invertido, cuyos vértices corresponden, de lado oeste, a la boca del estero de Celestún (90°25' longitud oeste), del lado este a las Bocas de Conil (87°32' longitud oeste) y al sur el discutido punto Put (89°14' longitud oeste y 18°44'06" latitud norte), que se encuentra en la intersección de los límites con Campeche y Quintana Roo. La máxima elevación en el territorio estatal es el Cerro Benito Juárez, con una altura de 210 msnm (Archivo General de la Nación, 1998).



Figura 3. Zona arqueológica Uxmal. Fotografía de Elizabeth Lamas, Lluvia en Uxmal, Yucatán, 2016. Archivos propios.

Clima: estacionalidad, precipitación, temperatura y humedad

En Yucatán se diferencian tres estaciones principales al año: 1) época de lluvias, 2) nortes y 3) secas. La temporada de lluvias abarca de junio a octubre y se caracteriza por lluvias regulares de tipo aguacero, con precipitación abundante (mayor a 60 mm mensuales). El mes más lluvioso es septiembre, con una precipitación media superior a 200 mm, señalando la influencia ciclónica en la cual se presentan fenómenos climatológicos como huracanes, depresiones tropicales y tormentas tropicales (Vidal, 2005).

La época de "nortes", como se le conoce localmente, es de noviembre a febrero, se caracteriza por bajas precipitaciones originadas por el movimiento de aire frío que proviene desde el Polo Norte, pueden contener fuertes vientos (50-90 km/h) de bajas temperaturas (Herrera-Silveira, 1993; Aranda-Cirerol, 2006). La temporada de secas comprende de marzo a principios de junio y se caracteriza por la práctica ausencia de precipitación, lo que ocasiona que algunos ecosistemas se vean afectados debido a la sequía.



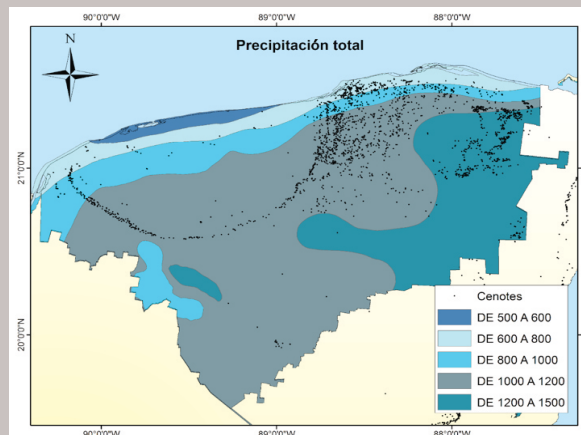
Figura 4. *Ciénega reserva El Palmar en época de secas. Fotografía de Elizabeth Lamas, La caminata más seca hacia Polak. Mayo 2015. Archivos propios.*



Figura 5. *Ciénega reserva El Palmar en época de lluvias. Fotografía de Elizabeth Lamas, Camino húmedo al Polak. Mayo 2015. Archivos propios.*

La precipitación media de Yucatán es de 1100 mm anuales, ocupando el lugar número 12 del país (INEGI, 2018). La precipitación decrece hacia el norte ya que ahí los vientos dominantes durante el verano soplan paralelos a la costa y producen un efecto de corriente en chorro que obliga a los vientos continentales a converger hacia ella, es decir, a soplar del continente hacia el mar, lo cual se manifiesta en una marcada disminución de la lluvia.

Figura 6. Mapa de la precipitación del estado de Yucatán.



Una gran parte de la precipitación es de tipo convectivo, ocasionada por los movimientos verticales del aire que asciende al calentarse por estar en contacto con la superficie terrestre caliente. La máxima transferencia de calor por convección se da en los meses de mayo y junio, período con el registro de la temperatura más alta, por lo tanto, se está calentando la superficie terrestre.

La temperatura media anual del estado es de 26.3 °C, los meses más cálidos son de mayo a agosto con temperaturas medias que van de 25 a 28 °C, y los más fríos son de diciembre a febrero con temperaturas entre 22 y 24 °C. El mes con mayor temperatura es mayo, con una media máxima de alrededor de 36 °C. Por el contrario, el mes de enero es el más frío, en el cual la temperatura promedio mínima es de 16 °C (INEGI, 2017).

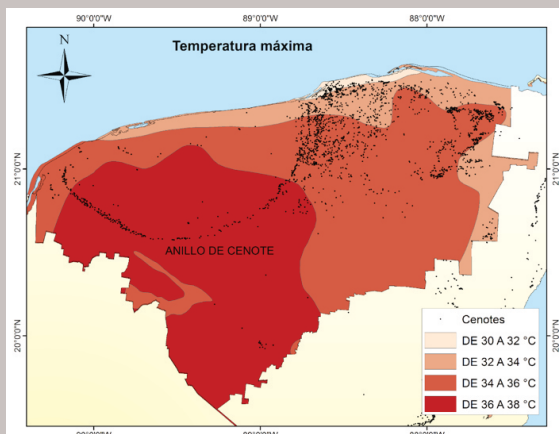
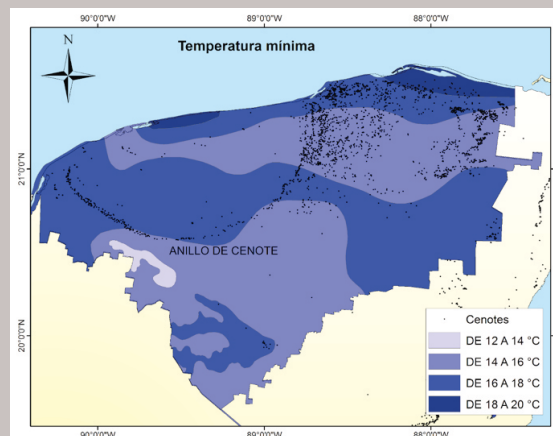


Figura 8. Mapa de la temperatura mínima media en el estado de Yucatán.

Figura 7. Mapa de la temperatura media máxima en el estado de Yucatán.



De manera general, el 85.5% de la superficie del estado presenta un clima cálido subhúmedo y el 14.5% restante corresponde a un clima árido y semiárido, el cual se localiza en la parte norte de Yucatán. Este tipo de clima se debe a la ubicación geográfica del estado, el cual se localiza al sur del trópico de Cáncer.

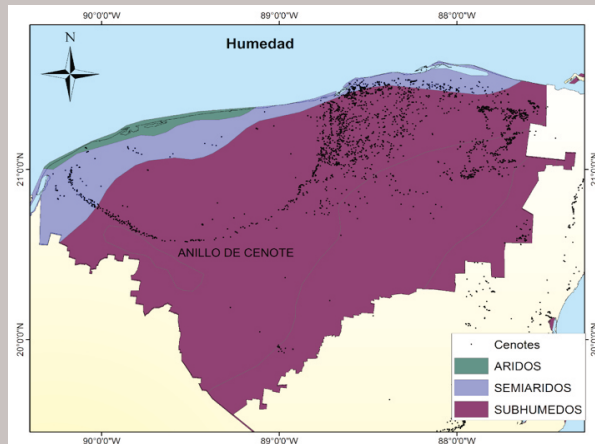
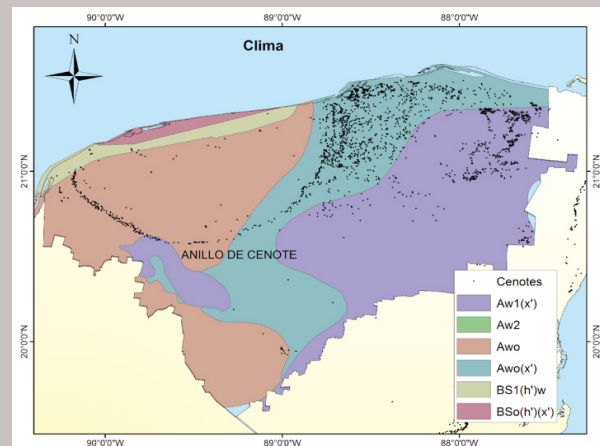


Figura 10. Mapa de los tipos de clima presentes en el estado de Yucatán.

Figura 9. Mapa del tipo de humedad en el estado de Yucatán.



Como interacción de todos los factores climáticos y de acuerdo con la clasificación de Köppen modificada por García (2004), en Yucatán existen los siguientes tipos de climas (**Figura 10**):

$Aw0(i')$: cálido, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano y porcentaje regular a bajo de lluvia invernal.

$Aw0(x')(i)$: cálido, el más seco de los subhúmedos, con lluvias en verano, así como alto porcentaje de lluvia invernal.

$Aw1(x')(i)$: cálido, subhúmedo, con lluvias en verano y alto porcentaje de lluvia invernal.

$Aw2(x')(i)$: cálido, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y alto porcentaje de lluvia invernal.

$Bs1(h')x'$: cálido, el menos seco de los semiáridos, con régimen de lluvias en verano.

$Bs0(h')x'$: cálido, el más seco de los semiáridos, con lluvias intermedias e irregulares con tendencia a distribuirse hacia el verano.

Todos los climas presentan poca oscilación térmica y su máxima temperatura es antes del solsticio de verano.

Geología e hidrología

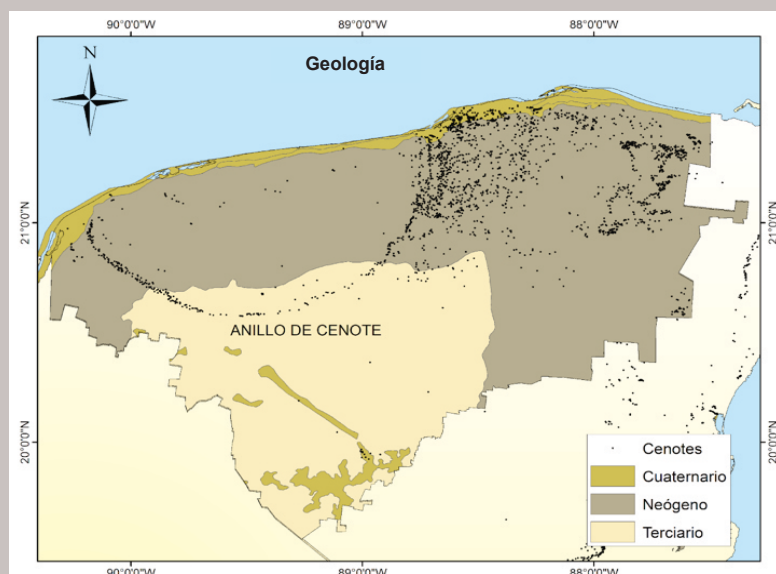
Geológicamente, el estado de Yucatán es la parte de la península de Yucatán con rocas más recientes, el sustrato encontrado es relativamente uniforme y está compuesto por carbonato de calcio o magnesio en un 90% (Bautista, 2005).

La superficie de Yucatán presenta características singulares al resto del país, ya que cuenta con una superficie uniforme, casi plana. Esto genera la ausencia de escorrentía de agua en la superficie, su poca inclinación, con dirección sur a norte, tiene un gradiente hidráulico casi nulo además de la poca existencia de suelo, apenas 20 cm en promedio (García *et al.*, 2010).

La composición superficial es en su totalidad roca sedimentaria carbonatada y derivadas de éstas. Las calizas en la superficie se encuentran formando una coraza. La coraza caliza es de extrema dureza y constituye la superficie del relieve en grandes territorios (Bautista, 2005). Las calizas blandas son un rasgo fisiográfico característico del relieve de toda la península y representa una transición de la evolución de la roca dura original, la alteración posterior y la transformación en la coraza caliza, además favorece el desarrollo de las formas kársticas subterráneas (Bautista, 2005).

El subsuelo del estado de Yucatán está conformado por una secuencia de sedimentos en su mayoría terciario y del Neógeno (**Figura 11**) y ha estado bajo subsidencia lenta, pero continua. El Cuaternario aflora hacia las zonas costeras y corresponde a depósitos calizos expuestos después de una ligera emersión de la península (Bautista, 2005; García *et al.*, 2010; COMEY, 2011).

Figura 11. Mapa de la geología del estado de Yucatán.



La zona costera comprende áreas con playas de barrera y lagunas de inundación, además de una serie de bahías someras que incluyen depósitos recientes como arenas de playa, arcillas, turbas y calizas de moluscos. Sus límites están definidos por la línea de costa y una línea paralela a ésta hasta de 20 km (COMEY, 2011).

Los sistemas kársticos presentan una serie de complejos procesos fisicoquímicos, con un proceso continuo de disolución de la roca. Éstos son frecuentes en varios tipos de rocas como yesos, calizas y dolomías (López-Gueta *et al.*, 2009). Los acuíferos kársticos proporcionan el 25% de los suministros mundiales de agua potable, sin embargo, son muy susceptibles a la contaminación (Ford y Williams, 2007). El acuífero se recarga por la infiltración de aguas de lluvia y los volúmenes que se descargan al mar después de los usos superficiales.

Los cenotes

La palabra cenote proviene del maya *ts'ono'ot* o *d'zonot*, que significa "caverna con depósito de agua".

La naturaleza caliza del suelo trasmina el agua y se deposita en mantos freáticos formando cerca de la costa una lente de agua que flota sobre una masa de agua salina, más densa, cuyo origen es la intrusión marina. Esta lente es la única fuente de agua dulce que tiene la península de Yucatán. Esta acumulación va formando los cenotes por medio de la disolución de roca caliza que pueden ser visibles en forma de grandes depresiones, con aspecto típicamente de cilindro.

En la **Figura 12** se representa el proceso de formación de los cenotes:

- A) Disolución: el agua comienza a disolver la roca.
- B) Caverna: con el tiempo, este proceso crea grandes cavernas que están muy cerca de la superficie del terreno.
- C) Cenote maduro: la disolución de la roca continúa, el techo se colapsa y deja al descubierto un gran agujero abierto y, en ocasiones se puede observar un cono de derrubios en el fondo, por debajo del agua.
- D) Cenote sin agua: algunos cenotes no contienen agua porque el nivel freático está por debajo del suelo del cenote.

Estos cenotes se distribuyen heterogéneamente por casi toda la península y en el estado de Yucatán se alinean en su zona oeste, formando el denominado Anillo de Cenotes, que crea una geometría en planta semicircular de cenotes, con una red cavernosa compleja que se relaciona con la teoría del impacto de un asteroide que, aparentemente, influyó en la formación de este Anillo (Alcocer y Escobar, 1996). El Anillo de Cenotes abarca por el oeste desde el puerto de Celestún y su reserva ecológica (Ría Celestún) y por el noreste parte del municipio y puerto de Dzilam de Bravo.

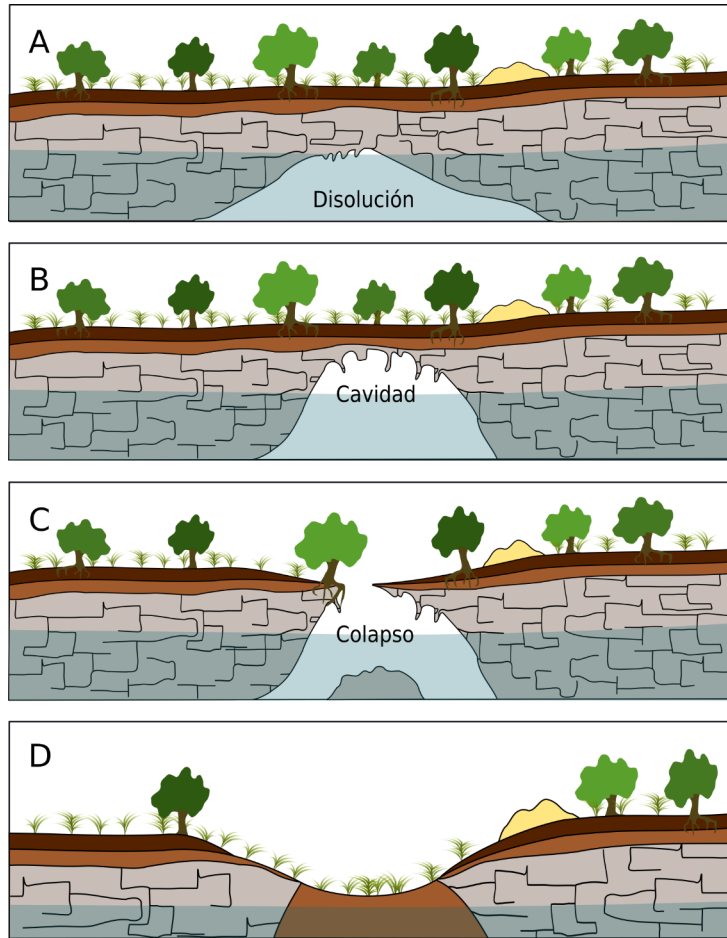
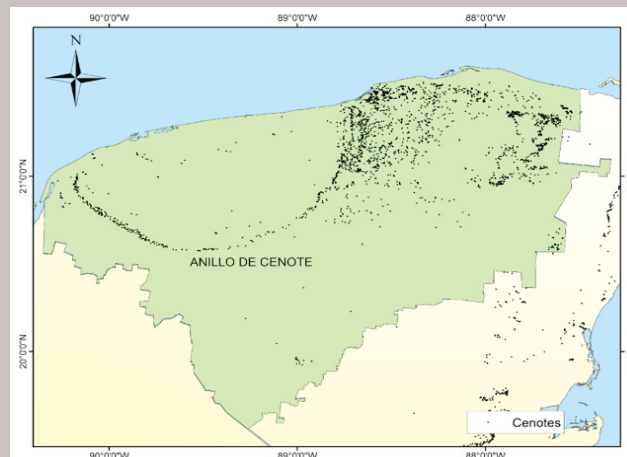


Figura 12. Proceso de formación de los cenotes.

Figura 13. Distribución espacial de cenotes en el estado de Yucatán.



El número estimado de cenotes en el estado de Yucatán va de los 7000 a los 8000. Existen diferentes clasificaciones de los cenotes: por su morfología, pueden clasificarse como abiertos (i), semi abiertos (ii), cerrados (iii) y cavernas o grutas (iv); por sus características geológicas, los cenotes se clasifican como jóvenes y maduros (Bedows, 2008).



Figura 14. *Tipología morfológica de los cenotes en la península de Yucatán. A) Cenote Xbatum y B) cenote Kikil; cenote gruta o caverna: C) cenote Paraíso Papacal; cenote cerrado: D) cenote en Valladolid; cenote semi abierto: E) cenote Noh Mozon y F) cenote Kancabá.*

Lagunas costeras

Otros de los cuerpos de agua importantes en Yucatán son las lagunas costeras. Toda laguna costera tiene una conexión permanente o efímera con el mar. Sin embargo, la presencia de descargas de agua dulce por afluentes es típica de las lagunas costeras estuarinas, (Herrera-Silveira, 2006).

Yucatán tiene cuatro lagunas costeras, de las cuales, dos convergen con el denominado Anillo de Cenotes, como se puede observar en la **Figura 15**.

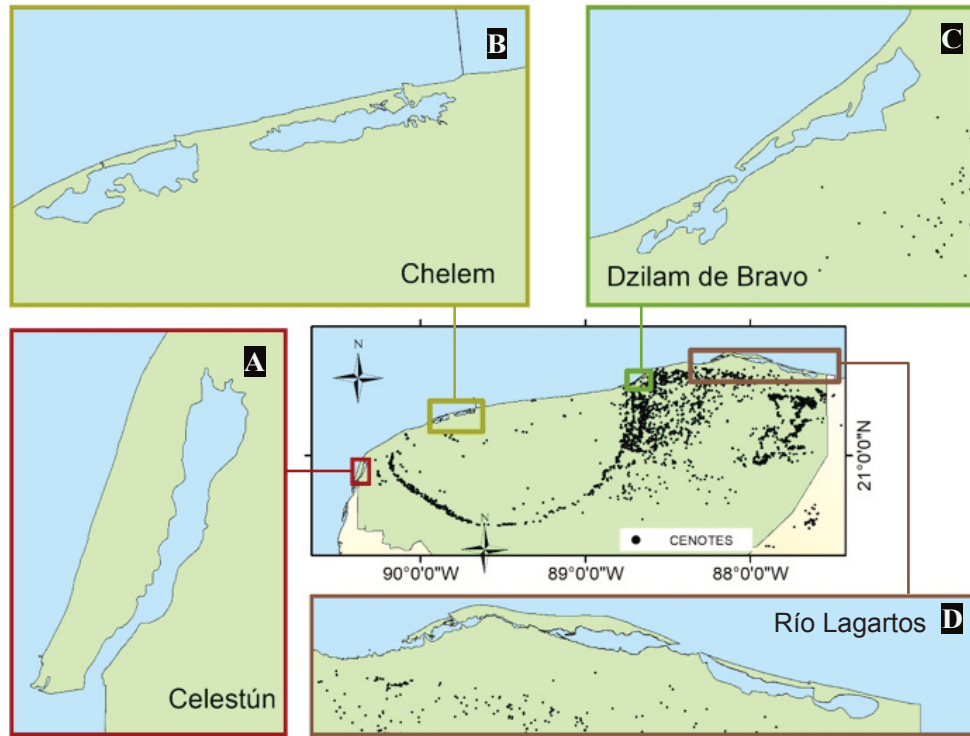


Figura 15. Localización de las principales lagunas costeras del estado de Yucatán. (A) Laguna de Celestún, (B) Laguna de Chelem, (C) Laguna de Dzilam de Bravo y (D) Laguna de Río Lagartos.



Figura 16. Boca de la Laguna de Celestún. Fotografía de Elizabeth Lamas, Atardecer en Celestún, Julio 2016. Archivos propios.

Laguna de Celestún

Esta laguna presenta una gran influencia de los aportes del agua subterránea a través de los numerosos manantiales (ojos de agua) distribuidos a todo lo largo de dicha laguna, este aporte de agua dulce cambia la concentración de la salinidad, presentando en la laguna un gradiente salino, donde la parte más dulce o menos salada se encuentra en la parte de la cabeza de la laguna y la parte más salada, en la boca.

La laguna puede tener afectaciones por diferentes actividades antropogénicas como la contaminación, actividades turísticas y la pesca. Esta laguna converge en el extremo oeste en el semicírculo del denominado Anillo de Cenotes.

Laguna Dzilam (Las Bocas)

La morfología de esta laguna es muy importante, ya que su geometría en planta es alargada y tiene una barra de sedimentos que la separa del mar, que se estrecha hasta el centro y se ensancha hacia los bordes, ello da lugar a importantes variaciones temporales de salinidad y temperatura. Los aportes que recibe de agua dulce y agua salada del mar generan una importante producción biológica. En esta laguna que converge en el extremo este con el semicírculo del Anillo de Cenotes se realizan actividades de ecoturismo y pesca.

Laguna de Chelem

Esta laguna contiene una excesiva concentración de salinidad, inclusive en la zona denominada *pista de canotaje*, el agua es de mala calidad para la vida, ya que en esta laguna se registra mucha actividad humana cuyos impactos son muy importantes, debido a las descargas de aguas residuales que sufre permanentemente, aun así se llevan a cabo actividades de pesca y ecoturismo.

Figura 17. *Laguna de Chelem. Fotografía de Ismael Ocegüera, 2016.*



Figura 18. *Laguna de Dzilam. Muelle. Fotografía de Ismael Ocegüera, 2016.*

Ría Lagartos

La salinidad de esta laguna varía conforme es más cercana al centro y al oriente, esto favorece a la industria salinera del estado. La morfología de esta laguna se caracteriza por ser larga y estrecha con entrada de agua de mar sólo por el oeste (Herrera-Silveira, 2006).



Figura 19. Laguna de Ría Lagartos. Fotografía de Ismael Ocegüera, Esperando a salir, 2015.

Cultura

Los cenotes también tienen una importancia por cuestiones culturales. A lo largo de la historia y el mundo, grandes culturas se han desarrollado en torno a los mantos acuíferos por su disponibilidad y acceso a este recurso natural e indispensable como es el agua. Yucatán no es la excepción y, desde tiempos remotos, el desarrollo de la cultura maya tiene una estrecha relación con los cenotes.

Figura 20. Casa típica de trabajadores de una hacienda. Fotografía de Elizabeth Lamas, Hacienda escondida, septiembre 2016.



Las cuevas y cenotes han sido escenarios de gran importancia para la civilización maya desde tiempos ancestrales, ya que se consideraban portales o ventanas al mundo de los muertos: el inframundo, un mítico lugar que se ubicaba físicamente en el subsuelo terrestre y bajo el agua, donde moraban los dioses, los antepasados y demás seres sobrenaturales. Para llegar a él, las personas al morir recorrían un largo camino llamado *Xibalbá*.



Figura 21. Vasija encontrada dentro de un cenote.

Debido a las características químicas del agua, la falta de luz y los sedimentos finos y mineralizados, estos espacios han favorecido la preservación de vestigios arqueológicos, así como paleontológicos.



Cenote Angelita, ubicado en la región de Tulúm, Quintana Roo. La peculiaridad de este cenote es la espesa nube de ácido sulfhídrico, que da la apariencia de estar buceando sobre un río dentro de un cenote. Buza: Luis Monsiváis Alcocer. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.

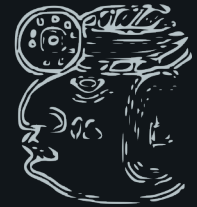




ooo



ooo



ooo

Capítulo 3

La génesis de los cenotes: entre lo terrestre y lo extraterrestre

Jaime Urrutia Fucugauchi,¹ Pedro A. Robledo,² Ligia Pérez Cruz,¹
Elizabeth Lamas,³ Ramón Castañer¹

¹Instituto de Geofísica, UNAM

²Unidad del Instituto Geológico y Minero de España, Islas Baleares

³Unidad de Química-Sisal, Facultad de Química, UNAM



ooo



ooo



ooo

Introducción

Desde que se detectó primero una estructura de impacto en la década de los cincuenta y, a partir de los años setenta, se corroboró un patrón de anomalías circulares concéntricas en el borde norte de la península de Yucatán (Penfield y Camargo-Zanoguera, 1981; Hildebrand *et al.*, 1991), han sido numerosos los estudios e interpretaciones, tanto del ya famoso cráter de Chicxulub, como de la relación genética con el denominado Anillo de Cenotes (Perry *et al.*, 1995; Hildebrand *et al.*, 1998; Kinsland *et al.*, 2005). En esta estructura geométrica, semicircular en su área terrestre y circular en su conjunto, cuyo límite parece corresponder al borde del cráter, la agrupación de cenotes y dolinas sugieren muchas interpretaciones. Entre las más aceptadas por la comunidad científica se ha sugerido que hubo una cuenca de agua dentro de la estructura durante la era Cenozoica, después del impacto o una actividad hidrogeológica controlada por un conjunto de fracturas derivadas de impacto del cráter (Perry *et al.*, 1995). Las aguas subterráneas de esta cuenca disolvieron la caliza y crearon las cavernas y cenotes que se encuentran hoy bajo la superficie.

No obstante, surgen algunas interrogantes en cuanto al hecho de atribuir un fenómeno causa-efecto a la formación de cenotes. Se abre por tanto la posibilidad de que sean varias causas las que originaron la formación de estas estructuras kársticas en suma espectaculares y, obviamente, que sea un proceso mixto entre los procesos activos terrestres y el impacto de un meteorito extraterrestre. Por ello, surgen algunas preguntas: si se trata de la evolución de un sistema kárstico tropical que se desarrolla casi en su totalidad en calizas del Eoceno, Mioceno, Plioceno o posterior, decenas de millones de años después del impacto del meteorito, ¿por qué se considera que es un proceso que tiene lugar entre muy pocos millones de años? O ¿por qué hay cenotes dentro y fuera del Anillo? Incluso, prácticamente en la totalidad de la península se ha constatado la existencia de cenotes. ¿Existe un patrón de distribución espacial que indique esa relación directa entre el impacto del meteorito y los cenotes? o ¿la geometría en planta y en sección de los cenotes puede indicar qué tipo de procesos operaron en su formación? En definitiva, existen algunas incertidumbres que todavía permiten analizar con más detenimiento las miles de depresiones observadas en la península de Yucatán y si existía o no una relación causa-efecto. Por ello, podemos estar ante formas del karst cuyo proceso involucre aspectos propios de dicho fenómeno, hasta otros derivados del choque de un gran meteorito que pudo causar un periodo crítico en la historia de la Tierra

que, entre otras consecuencias, produjo la extinción de los dinosaurios a finales del Cretácico.

La península de Yucatán en su sector noroeste se caracteriza por una estructura kárstica regional en forma de semicírculo compuesta de numerosos cenotes. Los cenotes, formados por disolución de las rocas carbonáticas, están asociados a un patrón de fracturamiento vinculado, a su vez, con una estructura en el subsuelo de grandes dimensiones –el cráter Chicxulub. El cráter, formado por el impacto de un asteroide hace unos 66 millones de años, fue cubierto por sedimentos carbonatados con espesores de entre 800 a 1000 m. El impacto se asocia a la extinción masiva del final del Cretácico tardío y marca el límite Cretácico/Paleógeno. El cráter tiene un diámetro de aproximadamente 200 km y formó una cuenca de depósito en la plataforma carbonatada durante el Paleógeno. La estructura se caracteriza por un levantamiento central, anillo de picos y morfología multianillo. Con la emergencia de la plataforma y cambios de nivel del mar, las rocas carbonatadas en la península presentan estructuras kársticas. En los últimos años, se han llevado a cabo diversos estudios geofísicos y geológicos, así como programas de perforación, que incluyen gravimetría, magnetometría, electromagnéticos, sísmica de reflexión, perforaciones someras y perforación profunda en la zona marina y terrestre del cráter. Los procesos y rasgos superficiales, morfología, karsticidad, hidrogeología y fracturamiento presentan relaciones con las estructuras, tales como borde del cráter, zona de terrazas, levantamiento central, anillo de picos y con la distribución y espesores de los depósitos de brechas y roca fundida en el cráter.

Lo extraterrestre: el impacto del gran meteorito

El sector norte de la península de Yucatán se caracteriza por un relieve con bajas elevaciones y la ocurrencia de estructuras y formas kársticas (López-Ramos, 1975; Lugo-Hubp *et al.*, 1992). No existe el desarrollo de una red fluvial importante y los escurrimientos son controlados por flujos de agua subterráneos, variaciones en la precipitación, características de las secuencias carbonatadas y fracturamiento. Los procesos de disolución de las rocas carbonatadas están asociados al fracturamiento, flujos de agua, intrusión salina, cambios de nivel del mar y precipitación. La distribución de formas kársticas está relacionada con los patrones de deformación y las áreas de mayor fracturamiento presentan altas densidades de cenotes, delineando diferentes sectores en la península. En el sector noroeste destaca la distribución y densidad

de cenotes formando una estructura semi-circular en el Anillo de Cenotes. Éste ha sido asociado a la estructura de impacto Chicxulub (Pope *et al.*, 1991; Pope *et al.*, 1993) y correlacionado con la proyección en superficie del borde y la zona de terrazas del cráter, mapeada por las anomalías geofísicas de campos potenciales (Hildebrand *et al.*, 1991, Hildebrand *et al.* 1998; Connors *et al.*, 1996).

Las características y presencia del cráter fueron inicialmente reconocidas a partir de los programas de exploración de Petróleos Mexicanos (Pemex) en la península (Cornejo y Hernández, 1950; Penfield y Camargo-Zanoguera, 1981). Los estudios de gravimetría documentaron un patrón de anomalías semi-circulares concéntricas, que fue investigado a través de pozos exploratorios. Los pozos Chicxulub-1, Sacapuc-1 y Yucatán-6 cortaron, a profundidades de alrededor de 800-1100 m, una secuencia de rocas con texturas ígneas de composición andesítica, que fue interpretada en términos de una estructura intrusiva o volcánica. A fines de los años setenta, estudios aereomagnéticos mostraron la presencia de anomalías magnéticas en el sector central del máximo gravimétrico. Los patrones de anomalías gravimétricas y magnéticas fueron interpretados por Peinfeld y Camargo (1981) en términos de un cráter de impacto. El cráter fue asociado con la extinción masiva de fines del Cretácico. Sin embargo, la estratigrafía documentada en los pozos indicaba edades más antiguas (López-Ramos, 1975). Estudios subsecuentes confirmaron el origen por impacto, con una edad para la estructura de ~66 millones de años, asociándola a la extinción masiva del límite Cretácico/Paleógeno (K/Pg) (Hildebrand *et al.*, 1991; Sharpton *et al.*, 1992).

El cráter Chicxulub formó una cuenca con un sistema hidrotermal que modificó las condiciones de sedimentación y transporte en la plataforma. El sistema hidrotermal cesó su actividad en ~1-2 millones de años y la cuenca fue rellenada por sedimentos carbonatados durante el Paleógeno. El levantamiento de la plataforma y procesos eustáticos fueron cambiando las condiciones en la plataforma, que estuvo parcialmente emergida en diversos periodos. Los cambios de nivel del mar al final de las glaciaciones del Pleistoceno tardío dieron lugar a la configuración actual, en que una mitad del cráter está en la península y el resto bajo el mar (**Figuras 1 y 2**). Las características de la geología superficial están influenciadas por la presencia de la estructura, incluyendo los procesos de deformación y circulación de aguas subterráneas. Las relaciones entre el Anillo de Cenotes, patrones de fracturamiento, aguas subterráneas y la estructura de cráter han sido

investigadas en diversos trabajos (Pope *et al.*, 1993; Perry *et al.*, 1995; Connors *et al.*, 1996; Hildebrand *et al.*, 1998; Kinsland *et al.*, 2000; Kinsland *et al.*, 2005). A partir de estos estudios se han desarrollado diferentes modelos para explicar las relaciones e influencia del cráter en los procesos superficiales. Estas relaciones y procesos se analizan en estas notas, en referencia a los modelos de estructura derivados de los datos geofísicos y los programas de perforación.

Cráter Chicxulub

El cráter Chicxulub constituye uno de los tres cráteres de impacto de mayores dimensiones identificados en nuestro planeta. El cráter tiene un diámetro de alrededor de 200 km y yace cubierto por una secuencia de rocas carbonatadas de edad Cenozoica, en el sector noroeste de la península de Yucatán (**Figura 1**). El cráter se formó hace unos 66 millones de años por el impacto de un bólido de unos 10-14 km de diámetro que está asociado con los eventos que marcan el límite Cretácico/Paleógeno. Los efectos del impacto en los sistemas de soporte de la vida en el planeta causaron la extinción del 75% de las especies, entre ellas los dinosaurios y las amonitas (Álvarez *et al.*, 1980; Schulte *et al.*, 2010).

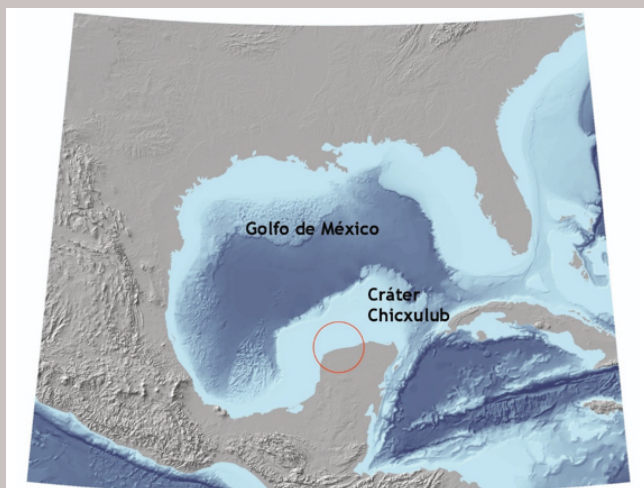
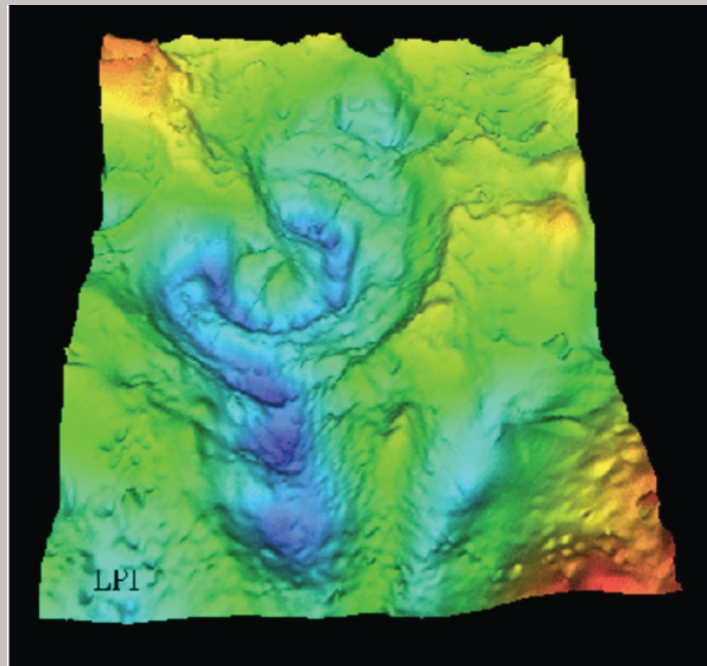


Figura 1. El cráter Chicxulub se localiza en el sector noroeste de Yucatán, en el sureste del Golfo de México. El cráter está parcialmente en mar y parcialmente en tierra, con centro geométrico en la línea de costa en Chicxulub Puerto.

En la formación del cráter, el impacto produjo temperaturas y presiones altas en el sector central (Melosh, 1989), suficientes para vaporizar el bólido, excavar y fragmentar la corteza a profundidades del orden de 25 km. En unos segundos, los procesos de fragmentación y excavación produjeron la eyección y formación una nube de fragmentos y gases a alta temperatura que alcanzó varios kilómetros de altura y la eyección

Figura 2. Anomalía de Bouguer del cráter Chicxulub, mostrando la morfología de cráter complejo multi-anillo (Sharpton et al., 1993). Mapa de anomalías construido a partir de mediciones de gravedad en la península y en la plataforma marina.



con velocidades mayores a la de escape. Los mecanismos de eyección incluyeron la nube central, tiros parabólicos, desplazamiento de bloques de mayores dimensiones (con la formación de cráteres secundarios) y cortinas de eyecta. En el transcurso de unos minutos, la fragmentación y excavación a profundidad en la corteza incluyó el levantamiento del basamento, que se elevó varios kilómetros sobre el cráter. Éste fue seguido por los mecanismos de formación del cráter: colapso, zona de terrazas, anillos de picos, unidad de roca fundida. Los efectos de turbulencia, colapso de material dentro de la nube y cortinas de eyecta ocasionaron el depósito de material fragmentado en la zona del cráter, que constituye las secuencias de brechas de impacto. Estos procesos son críticos en la formación de los cráteres complejos con la dinámica de impacto, colapso y efectos. En unos minutos se produjo la formación de la estructura del cráter, caracterizado por una cuenca amplia limitada por el anillo topográfico, un levantamiento central y zonas de terrazas, dentro del cual se depositaron el material eyectado y colapsado junto con el material fundido. Procesos post-impacto modificaron las estructuras, incluyendo el desplome de los altos topográficos por inestabilidades o fracturamiento, tsunamis, flujos de gravedad, colapsos y flujos de escombros.

Como parte del programa UNAM de investigaciones del cráter Chicxulub y el límite Cretácico/Paleógeno, en los últimos años se han realizado varios proyectos que incluyen el programa de perforaciones con recuperación continua de núcleos, con tres pozos que atraviesan la secuencia carbonatada y muestrean las secuencias de brechas de impacto, los proyectos de gravimetría marina, aéreo-geofísica con mediciones conjuntas de gravimetría y magnetometría aérea y geofísica terrestre, los experimentos sísmicos y los proyectos de perforación profunda (Hildebrand *et al.*, 1991; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996; Morgan *et al.*, 1997; Hildebrand *et al.*, 1998; Urrutia-Fucugauchi *et al.* 2004, Vermeesch y Morgan, 2004; Collins *et al.*, 2008; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2008; Vermeesch y Morgan, 2008; Ortiz-Alemán y Urrutia-Fucugauchi, 2010; Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2011; Gulick *et al.*, 2013).

La integración y análisis de la información permite investigar la estructura del cráter y las zonas adyacentes en la península de Yucatán con una resolución difícil de alcanzar en exploraciones geofísicas convencionales. La combinación de métodos geofísicos y los programas de perforación con recuperación continua de núcleos (**Figuras 3, 4, 5 y 6**), en una zona con contrastes fuertes de propiedades físicas (rocas carbonatadas y las litologías formadas por el impacto) en una área de bajo relieve (plataforma carbonatada), sin complicaciones estructurales (cráter de impacto cubierto por estratos horizontales de rocas carbonatadas), permiten construir modelos de alta resolución (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2011; Gulick *et al.*, 2013; Batista *et al.*, 2013).

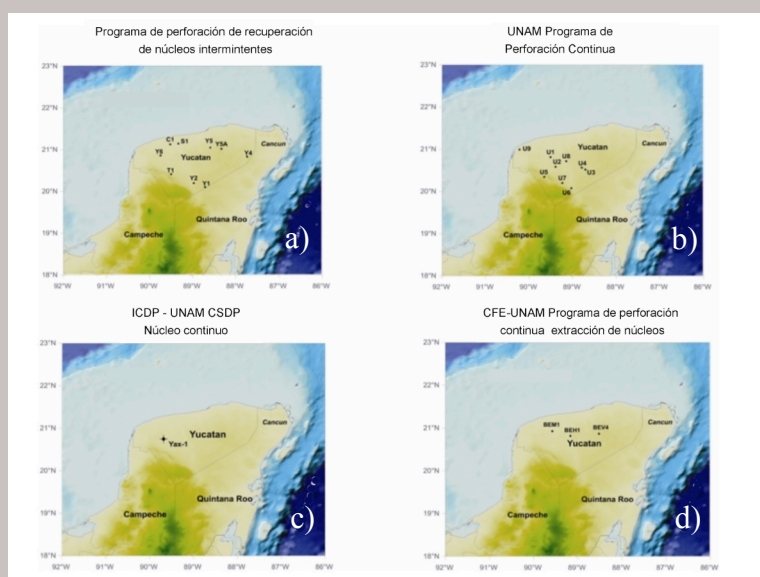


Figura 3. Programas de perforación en Yucatán y cráter Chicxulub. a) Programa de Pemex, b) Programa UNAM, c) Programa CSDP, d) Programa CFE UNAM. Pozos: Chicxulub-1, C1; Sacapuc-1, S1; Yucatán-1, Y1, Yucatán-5 a, Y5a; Yucatán-6, Y6; Ticul-1, T1. Proyecto de Perforación Científica del Cráter Chicxulub: UNAM-1 a UNAM-8 (U1 a U8). Programa CSDP Yaxcopoil-1, Yax-1. Programa CFE-UNAM BEM1, BEH1 y BEV4.

Figura 4. Imagen sísmica del perfil A-A1 mostrando la cuenca formada por el cráter, con el relleno sedimentario (tomada de Bell et al., 2004).

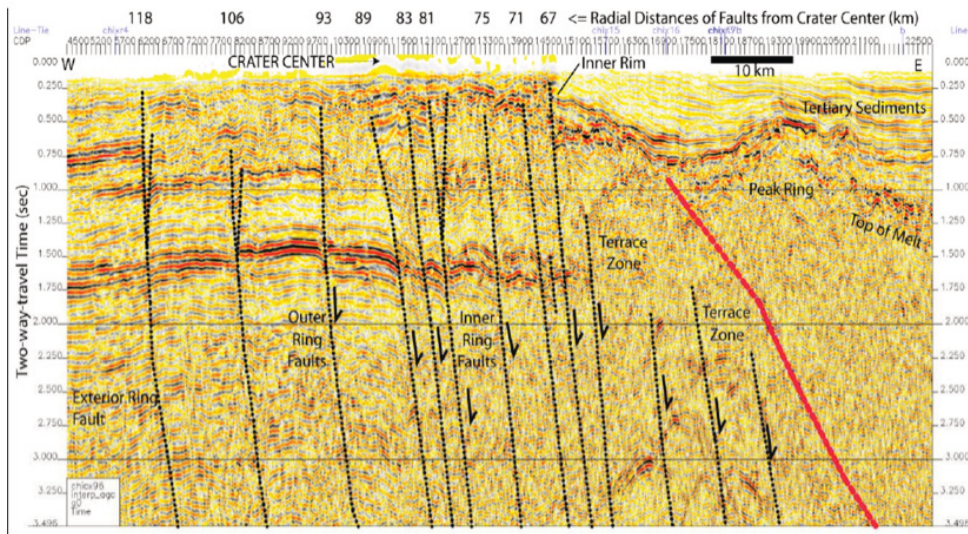
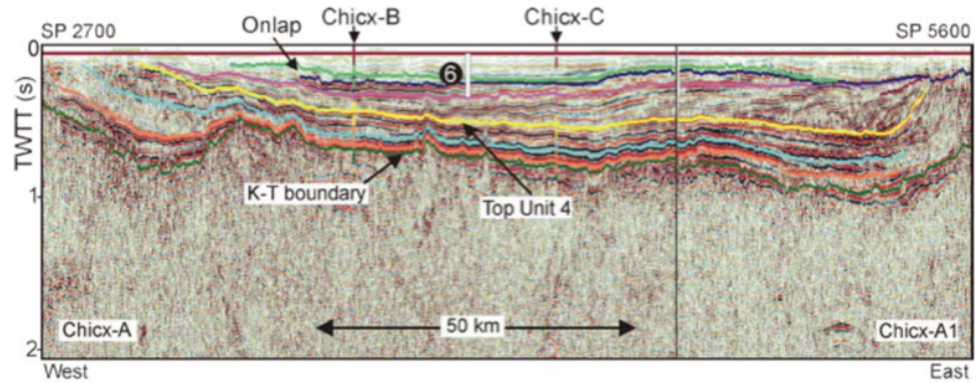
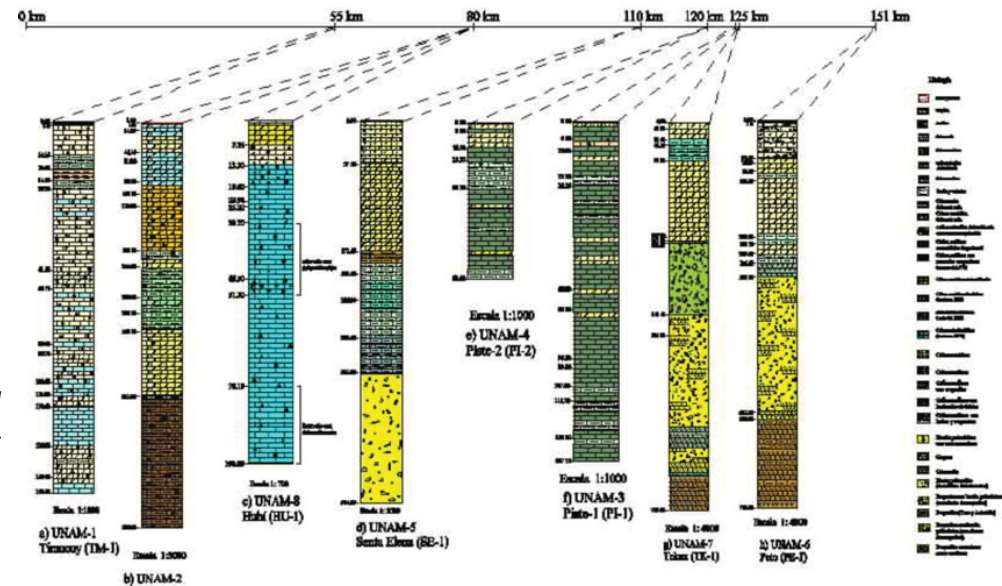


Figura 5. Perfil sísmico mostrando la zona de terrazas y sistema de fallas en el cráter (Gulick et al., 2013).

UNAM Drilling Program



**Continuous Core Recovery
3 Boreholes cored the impact breccias**

Figura 6. Columnas litológicas de los pozos perforados en la zona del cráter dentro de los proyectos de perforación de la UNAM y Perforación Científica del Cráter Chicxulub (Rebolledo Vieyra y Urrutia-Fucugauchi, 2004).

Los proyectos han permitido la perforación de doce pozos y la recuperación de alrededor de 6000 metros de núcleos (**Figura 3**). Los núcleos y muestras de recortes de las perforaciones se analizan en las dos nucleotecas y laboratorios del Programa Universitario de Perforaciones en Océanos y Continentes (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 2011). Los proyectos de perforación con núcleo continuo son los únicos realizados para investigar la estructura de impacto Chicxulub, constituyendo la fuente de muestras para análisis de laboratorio en el contexto internacional. Los núcleos representan la fuente de datos para investigar y caracterizar la estratigrafía somera de la plataforma carbonatada de Yucatán (**Figuras 7 y 8**), permitiendo análisis a escalas regional y local.

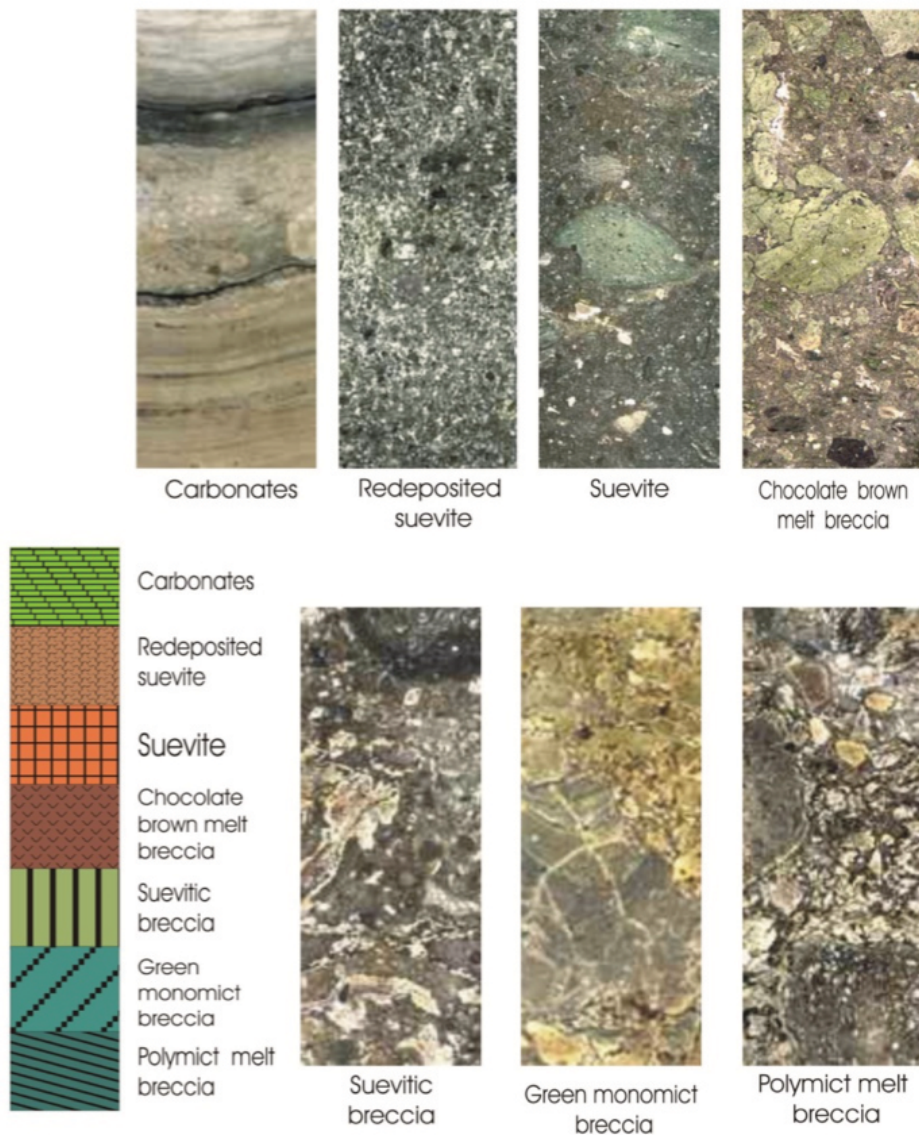


Figura 7. Ejemplos de los diferentes tipos de brechas en núcleos del pozo Yaxcopoil-1.

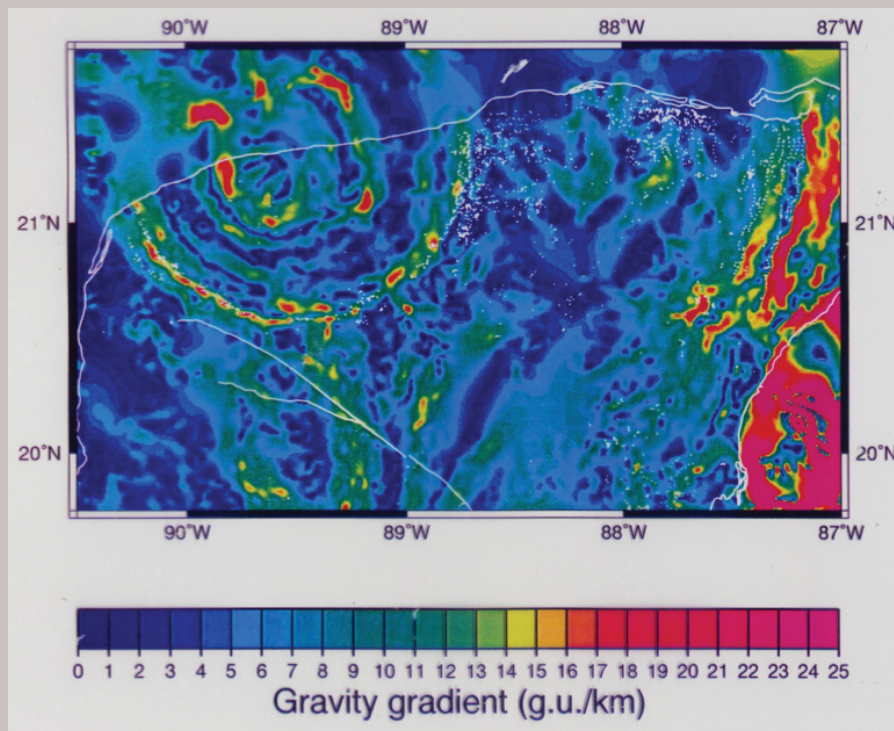


Figura 8. Mapa gravimétrico de gradiente horizontal en el cráter de Chicxulub (Connors et al., 1996). Los puntos en blanco representan los cenotes; en la zona del cráter presentan un arreglo circular que correlaciona con la anomalía gravimétrica.

Los estudios de registros de pozo y núcleos incluyen análisis de paleoclimas y paleoceanografía, investigando indicadores biológicos, físicos, mineralógicos, químicos e isotópicos. Los pozos muestrean secuencias carbonatadas del Cretácico y del Paleógeno. Los estudios iniciales se han enfocado al límite K/Pg y a los periodos del Paleoceno, Eoceno y Oligoceno, incluyendo al evento climático del Máximo Termal del Paleoceno-Eoceno PETM (Urrutia-Fucugauchi y Pérez-Cruz, 2008; Urrutia-Fucugauchi, 2016). Las secuencias carbonatadas han sido muestreadas en pozos en la plataforma y proporcionan registros de alta resolución para los eventos climáticos y los cambios globales de enfriamiento, con la construcción de los casquetes polares durante el Cenozoico.

El pozo Yaxcopoil-1 está localizado en la zona de terrazas en el sector sur del cráter (Urrutia-Fucugauchi et al., 2004), entre los pozos de Pemex Yucatán-6 y Ticul-1. En conjunto con la información geofísica de superficie y los registros geofísicos, proporciona datos de la estratigrafía regional dentro del cráter. En la perforación y núcleo se utilizó un sistema de documentación digital de los núcleos de perforación, que permite documentación de detalle de los núcleos y la integración de los estudios de laboratorio (petrografía, geoquímica, propiedades físicas, microscopía).

Entre los resultados está la caracterización de la secuencia sedimentaria, contacto brechas-carbonatos, secuencia de brechas y mega-bloques (**Figura 7**). Las características sugieren un medio de depósito de energía moderada, indicado por la presencia de estratificación cruzada. La presencia de glauconita en una capa de micro-conglomerado, que marca el límite, sugiere que la secuencia estuvo expuesta a condiciones sub-aéreas. El espesor de la secuencia en Yaxcopoil-1, entre el límite y el cambio de polaridad de reverso a normal, es de 4 cm y representa un intervalo de unos 250 ka. Los estudios en los núcleos del pozo Santa Elena, perforado en la zona exterior del cráter, indican un hiatus de unos 100 ka en el contacto entre las brechas de impacto y la secuencia sedimentaria (Urrutia-Fucugauchi y Pérez-Cruz, 2008).

En los núcleos de perforación se tienen registros extendidos de alta resolución de los límites Cretácico/Paleógeno y Eoceno/Paleoceno y eventos paleoclimáticos del Paleoceno, Eoceno y Máximo Termal del Paleoceno-Eoceno (PETM). Estos eventos marcan cambios mayores durante el Cenozoico con el descenso de temperaturas, eventos cálidos como PETM, formación de los casquetes polares. Dadas las condiciones de sedimentación en la plataforma y el control de la cuenca del cráter, se tiene una secuencia de carbonatos que permite la realización de estudios paleoclimáticos y paleoceanográficos de alta resolución.

Anillo de Cenotes

El cráter está cubierto por sedimentos carbonatados con espesor variable de hasta 0.8-1.2 km. El Anillo de Cenotes y rasgos topográficos correlacionan con las anomalías gravimétricas, en particular los patrones semi-circulares en anomalía de Bouguer y gradiente horizontal (**Figuras 2, 9 y 10**). Los modelos indican que las anomalías semicirculares delimitan el borde del cráter, zona de terrazas, anillo de picos y levantamiento central. El desarrollo del Anillo de Cenotes y los rasgos topográficos están asociados con el control estructural vía fracturamiento y compactación diferencial. Los patrones de anomalías correlacionan con la extensión y distribución de las brechas y roca fundida. Los modelados no permiten separar los efectos de los rasgos estructurales del borde y levantamiento central, de tal forma que el fracturamiento somero puede estar vinculado con una combinación de efectos, o bien, asociado a uno de ellos. Para un análisis de detalle se requiere levantamientos de gravimetría, magnetometría y GPS, las zonas de fracturamiento y desarrollos de cenotes en los sectores sur, suroeste y sureste, en los cuales se tienen pozos perforados cercanos. Ello permitirá separar los efectos y documentar las características y extensión de las fracturas a profundidad.

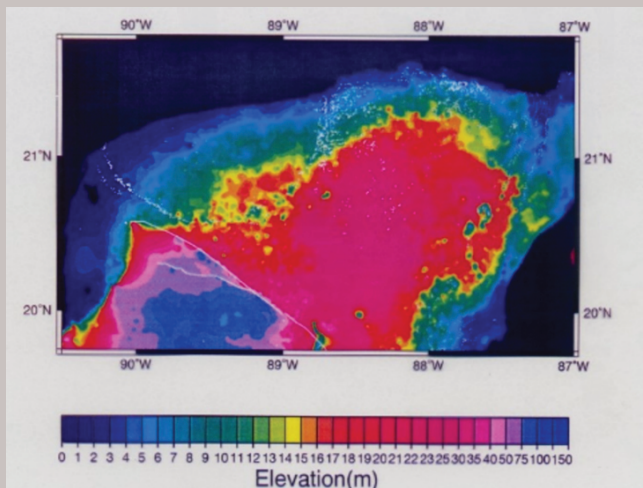


Figura 9. Mapa de elevaciones de la península de Yucatán (tomado de Connors et al., 1996). La proyección en superficie del borde del cráter está indicada por la depresión semi-circular.

Figura 10. Imagen de satélite de interferometría de radar de la península de Yucatán. El cráter Chicxulub con un diámetro aproximado de 200 km se localiza en la porción noroeste. Observe el rasgo semi-circular que marca la proyección del cráter en superficie, marcado por una pequeña depresión topográfica asociada con el Anillo de Cenotes (Urrutia-Fucugauchi et al., 2008).

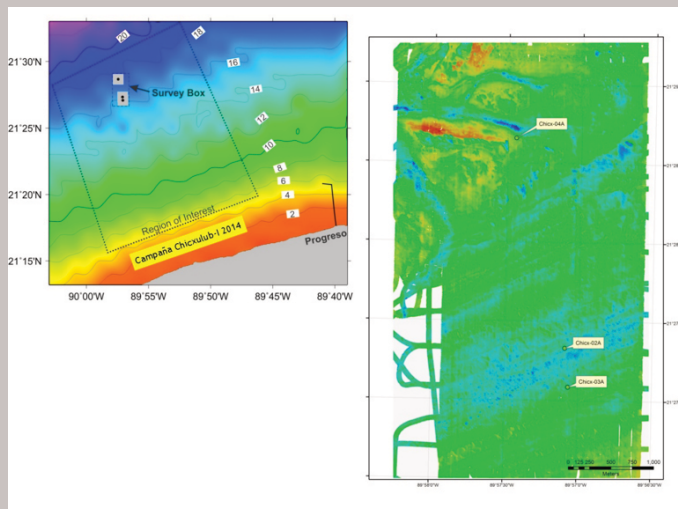
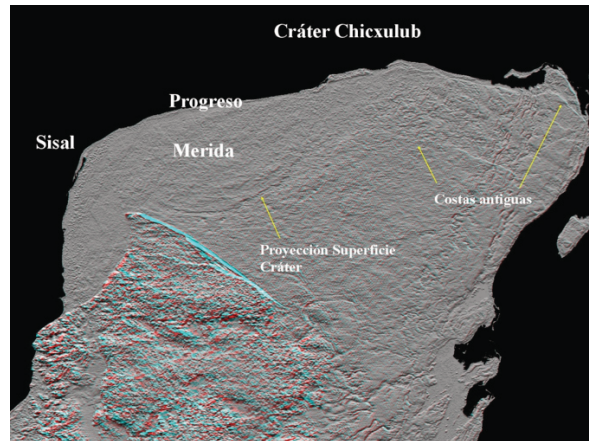


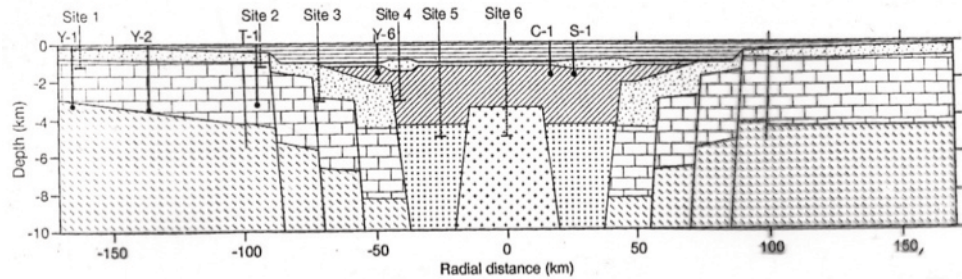
Figura 11. Batimetría multihaz del sector norte del cráter Chicxulub. Área norte de Puerto Progreso en el sector central (tomado de Goff et al., 2016).

Las relaciones entre el Anillo de Cenotes y la estructura de cráter han sido investigadas en diversos trabajos (Pope *et al.*, 1993; Perry *et al.*, 1995; Connors *et al.*, 1996; Hildebrand *et al.*, 1998; Kinsland *et al.*, 2005). Pope *et al.* (1993), a partir del análisis de patrones de fracturamiento en imágenes Landsat, propusieron que el Anillo de Cenotes está localizado en la zona límite entre el interior y exterior de la proyección en superficie del cráter, marcadas por nula y alta densidad de fracturas. En el estudio propusieron que la frontera entre las rocas carbonatadas con y sin fracturamiento controla el flujo de agua subterránea formando una barrera lateral, incrementando el flujo, procesos de disolución y la formación de los cenotes.

Perry *et al.* (1995) asociaron la formación del Anillo de Cenotes con cambios en la permeabilidad y el flujo de agua subterránea, proponiendo controles de (a) fallamiento reactivado por sedimentos post-Eoceno-Mioceno medio, (b) efectos de arrecifes coralinos desarrollados sobre el borde del cráter durante el Paleoceno o (c) colapso de brechas debidos a la consolidación o disolución de evaporitas. Perry *et al.* (1995) argumentaron que los efectos están asociados a la circulación regional, proponiendo controles a profundidad. Se tienen pocos datos sobre las variaciones de porosidad y permeabilidad en la secuencia carbonatada y sobre el fallamiento y fracturamiento. En la zona de terrazas y borde del cráter, los estudios sísmicos documentan un sistema de fallas que se extienden dentro del cráter (**Figura 5**). En la secuencia post-impacto, efectos de compactación diferencial en las brechas de impacto estarían asociados al hundimiento en superficie y reactivación de fallas. Efectos de fracturamiento pueden observarse en los estudios de atenuación y atributos sísmicos (Salguero *et al.*, 2010).

En el sector marino se cuenta con datos sísmicos de reflexión, incluyendo perfiles y un cubo sísmico, batimetría multihaz, magnetometría y muestreos superficiales. Estos estudios permiten caracterizar rasgos batimétricos y desarrollos kársticos (**Figura 12**). En los levantamientos marinos se han observado rasgos circulares cuya formación indica que el sector de la plataforma estaba emergido (Goff *et al.*, 2016). La propuesta, extrapolando las observaciones en tierra y los modelos geofísicos, es que los patrones de fracturamiento se extienden al sector marino de la plataforma.

Figura 12. Representación esquemática del cráter Chicxulub, indicando el levantamiento central, zona de terrazas, anillo de picos, depósitos de brechas.



Los impactos que forman cráteres complejos liberan una gran cantidad de energía en tiempos cortos. La zona de impacto es afectada por fracturamiento, se forman cavidades transitorias con profundidades de varios kilómetros y se excavan y remueven grandes volúmenes de roca. Parte del material fragmentado se redeposita constituyendo los depósitos de eyecta, los cuales presentan características diferentes, dependiendo de la distancia al punto de impacto. En la zona de impacto, los depósitos contienen fragmentos de rocas de la corteza inferior, indicando profundidades grandes de excavación en la cavidad transitoria, roca fundida asociada a temperaturas altas de fusión y minerales afectados por choque con sistemas de fracturas, indicando presiones altas (Melosh, 1989).

En la formación de cráteres de anillo de picos y multi-anillo se tiene el levantamiento central del basamento y la formación de sistemas de terrazas con fallamiento normal y patrones de fracturamiento radial. Los sistemas de fracturamiento presentan patrones radiales en la zona de impacto. Los mecanismos y características de los patrones de deformación, las escalas temporales y espaciales, el comportamiento de los materiales a alta presión y temperatura, la excavación y fragmentación de la cavidad transitoria y la eyección de grandes volúmenes de roca son parte de las interrogantes en las investigaciones planetarias sobre impactos.

La estructura del cráter tiene relaciones con las características geológicas superficiales de la península, los flujos de agua subterránea, la intrusión de agua marina, formación de estructuras kársticas y cenotes, la morfología y la zona costera.

El cráter no está expuesto en superficie, cubierto por unos 800-1000 m de carbonatos, su estudio requiere de métodos geofísicos y de perforaciones que permiten caracterizar la estructura. En superficie, las observaciones de satélite empleando imágenes multi-espectrales e interferometría de radar permiten delinear rasgos semi-circulares,

marcados por la topografía y el Anillo de Cenotes. Éste representa la proyección en superficie del borde del cráter, formado por fallamiento en el borde y zona de terrazas, y compactación diferencial de las brechas. Los estudios permiten analizar los acuíferos subterráneos y la evolución de la península con los cambios del nivel del mar.

Los estudios sobre el cráter Chicxulub en la península de Yucatán han atraído la atención de los principales grupos de investigación científica ocupados en temas diversos, como la extinción de organismos, evolución de la vida, impactos de cometas y asteroides, evolución tectónica, geohidrología en terrenos carbonatados, cambios climáticos, etc. El cráter Chicxulub ha sido relacionado con la extinción masiva de fines del Cretácico, con más del 75% de las especies (entre ellas los dinosaurios y las amonitas) que marcó el inicio de la era Cenozoica (con la diversificación de los mamíferos). El estudio del cráter Chicxulub y los eventos que marcan la transición del Mesozoico al Cenozoico han atraído la atención de numerosos grupos de investigación.

El descubrimiento del cráter fue resultado de los estudios de exploración de Pemex (Penfield y Camargo, 1981). La edad y asociación con los eventos K/Pg estuvieron relacionados con la búsqueda de secuencias del límite y del sitio de impacto, a partir del reporte relacionando el impacto con la extinción de fines del Cretácico (Álvarez *et al.*, 1980). Los estudios incluyen: las extinciones masivas de biota en el planeta y el surgimiento de nuevos patrones evolutivos; el origen de las discontinuidades estratigráficas de escala mundial; las causas del cambio climático global y el papel del CO₂ y compuestos de azufre en dichos cambios (Pope *et al.*, 1994; Schulte *et al.*, 2010); el tiempo para la restauración de los sistemas ecológicos después de las extinciones masivas y la deformación de la corteza, así como otras consecuencias asociadas a impactos. Para los estudios se requieren perforaciones y muestreo a diferentes niveles (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1996; Urrutia-Fucugauchi, 2004; Urrutia-Fucugauchi, 2008; Urrutia-Fucugauchi, 2011). Dentro de los aspectos aplicados resaltan los relacionados a geohidrología (acuíferos e intrusión salina profunda), estratigrafía y estructura y recursos minerales y energéticos. La información de los proyectos geofísicos y de perforación, en particular las perforaciones profundas, permite reconstruir la historia geológica de la península de Yucatán, los efectos del impacto y formación del cráter y las relaciones regionales y globales.

Los estudios forman parte de los Programas de Perforaciones en Océanos y Continentes y de Investigaciones sobre el Cráter Chicxulub y el Límite Cretácico/Paleógeno. Los estudios de geofísica marina y paleoceanografía forman parte de las Campañas Chicxulub-I y Chicxulub-II en el buque *Justo Sierra*. Se agradecen los apoyos de los proyectos UNAM-CABO y PAPIIT IG-101115.

Lo terrestre en la península de Yucatán

La palabra karst proviene del término *Kras*, una región italo-eslovena en la que se reconoció un relieve muy particular desarrollado en rocas calizas (Ford & William, 1989). Este término fue introducido por el geógrafo serbio Jovan Cvijic. El karst es el resultado de la disolución de ciertos tipos de rocas, especialmente rocas carbonáticas y evaporíticas, por un agua rica en CO₂ y un pH ligeramente ácido y, mediante una reacción química, es capaz de dar forma al paisaje hasta configurar verdaderos paraísos geoambientales, tanto en la superficie, conocido como *exokarst* y/o *lapiaz*, como en el subsuelo, conocido como *endokarst* o, comúnmente, llamado *cavidades*. El tipo de rocas que habitualmente experimentan este proceso se engloban en dos grandes conjuntos: las rocas carbonáticas (calizas, dolomías, brechas y otras) y las rocas evaporíticas (yesos, anhidritas, sales y otras), aunque también, de forma muy excepcional, en rocas cuarcíticas (Ford y William, 1989). En cuanto a la formación de estos paisajes distintivos, depende básicamente de la concurrencia de factores extrínsecos e intrínsecos, pero destacan sobre manera, las condiciones climáticas, estructurales y litológicas que favorecen su desarrollo. Por ejemplo, en el caso de las rocas calizas como las que conforman la península de Yucatán, su disolución se ve favorecida por el elevado contenido en CO₂ en el ambiente, propio de un clima tropical o subtropical, condiciones químicas de acidez y temperaturas muy altas. Los parajes kársticos son muy característicos en regiones tropicales donde la roca caliza es protagonista y está asociada a todo un elenco de elementos geológicos e hidrogeológicos que se convierten en la base para la subsistencia de ecosistemas, siendo por tanto estas regiones muy geo y biodiversas.

El exokarst

Las formas exokársticas en la península de Yucatán son poco abundantes y menos espectaculares que las descritas en otros lugares del planeta (Robledo y Durán, 2016). La abundante vegetación y el escaso relieve dificultan la formación de extensos campos de lapiaz, además de que impide el acceso a zonas donde éste podría haberse

desarrollado. Este aspecto es también un problema a la hora de intentar observar estos enclaves mediante técnicas estereoscópicas o visores espaciales. Los principales factores que condicionan el limitado desarrollo del exokarst de la península de Yucatán son el contexto edafológico, con poco desarrollo de los suelos, y el efecto de la vegetación interceptando el impacto de las gotas de agua tras eventos de precipitaciones. Sin embargo, es importante destacar el papel que juega el escaso relieve, lo cual impide la formación de formas típicas como las acanaladuras (necesitadas de un grado mínimo de pendiente), las distribuciones de facies y su composición litológica, con unidades muy heterogéneas compuestas por elementos muy solubles, como los fósiles marinos y otros menos solubles, como las calizas masivas. En este sentido, también se han identificado unidades muy solubles, pero con poca continuidad espacial, como las facies evaporíticas que conforman una parte de la serie litoestratigráfica. Sin embargo, en la península de Yucatán se han desarrollado espectacularmente las megaformas exokársticas, cuya máxima expresión, *a priori*, son los cenotes, aunque se ha constatado la presencia de dolinas, poljes y uvalas. Son, por tanto, las depresiones cerradas, las grandes protagonistas del karst tropical de la península de Yucatán. En cualquier caso, el endokarst es el gran protagonista, bien por la gran cantidad de cavidades diseminadas a lo largo y ancho de todo el territorio y por la constatación de impresionantes sistemas de galerías como los descritos en Quintana Roo, Ox Bel Ha y Sac Actún, ambos entre los cinco primeros del *ranking* mundial en relación con la longitud de sistemas endokársticos.

El karst en la península de Yucatán está fundamentalmente formado por el desarrollo en el subsuelo, con muy poca representación de formas exokársticas o lapiaz. En este sentido, aunque se han reconocido algunas microformas, cercanas a la sierra de Ticul, el exokarst está dominado por grandes formas del relieve.

En zonas muy concretas adentradas en parajes selváticos se han observado formas de karst cubierto, enterradas, aunque se trata de superficies de lapiaz cuya extensión es muy pequeña, en relación con el vasto territorio que ocupa la península de Yucatán. Esto se debe a que es una zona con poco desarrollo edáfico, donde domina la vegetación de selva media y baja tropical, lo que impide el desarrollo más amplio de las microformas.

Las megaformas, grandes protagonistas del exokarst, como indicábamos al principio, están representadas por depresiones cerradas. Las más importantes son las dolinas de disolución y colapso. También, se han podido observar poljes, ligados a fallas y uvalas, que son la coalescencia de múltiples dolinas, formando una gran depresión con magnitudes kilométricas, como es el caso de la laguna de Bacalar. No obstante, éstas son un ejemplo muy particular, ya que el nivel del agua de la laguna es el nivel piezométrico regional del acuífero y presenta en su perímetro varios cenotes interceptados por la gran laguna central debido al proceso de coalescencia (**Figura 13**).

Figura 13. A la izquierda, detalle del margen oeste de la laguna de Bacalar. En la parte derecha, imagen satelital de la misma zona en la que se observan dos cenotes en el borde del perímetro.



Las depresiones, en general, tienen desde pocos metros de diámetro hasta alcanzar longitudes de varios kilómetros en su radio. Los factores de control, las fallas y fracturas parecen jugar un papel decisivo; sin embargo, se ha podido constatar que el terreno también juega un papel clave en la distribución de facies de la plataforma carbonatada, que parte de la base geológica de la península.

El endokarst

El endokarst, por el contrario, es el gran protagonista de la península de Yucatán, con grandes volúmenes de cuevas, conductos y pasajes que forman lo que podríamos denominar “las arterias de la península de Yucatán”. Destacan sobre manera los sistemas de cavidades exploradas en Quintana Roo, especialmente Ox Bel Ha y Sac Actún, este último con más de 347 km de longitud (Robledo y Durán, 2016).

Se trata de sistemas endokársticos que tienen zonas subaéreas, pero una gran extensión de pasajes son zonas sumergidas, cuyo control genético parece estar ligado a un conjunto de grandes fracturas y a la disolución de la roca en la zona de mezcla entre el agua dulce y la salada del mar. Aunque son un referente del endokarst, existen otras cuevas importantes de características distintas y ubicadas en el interior de la península. Se trata de cavidades con presencia intermitente de aguas (en época de lluvias, en algunos ejemplos se puede observar un río subterráneo) con menos longitud y con grandes volúmenes en sus salas (**Figura 14**). En éstas se han observado formas típicas del endokarst como estalagmitas, estalactitas, coladas, excéntricas y otras menos comunes como bóvedas típicas de cuevas hipogénicas (formadas por aguas termales) o terrazas endokársticas de sedimentos detríticos que indican un nivel del agua estabilizado por encima del actual. Unas de las diferencias entre estas cuevas y las mencionadas con anterioridad es que, en las primeras, el nivel freático del agua coincide con el nivel freático del acuífero. Y en las cuevas continentales, los ríos y lagunas endokársticas están varios metros por encima del nivel freático regional.



Figura 14. Cueva ubicada cerca de la Sierra de Ticul, donde el nivel freático está por debajo del nivel de base de la cavidad. Se observan estalagmitas y estalactitas, así como otros espeleotemas vadosos, lo cual indica una dinámica hidrogeológica distinta que en los cenotes.

Esta característica hidrogeológica indica que existen, por lo menos, dos niveles piezométricos detectados: uno superior, más local y ligado a un acuífero colgado (acuitardo); y uno regional ligado a un acuífero muy extenso que ocupa la mayor parte de la península. Los cenotes pueden intersectar ambos acuíferos o sólo uno. Las denominadas *aguadas* (**Figura 15**) se corresponden con depresiones cerradas del terreno ligadas a un acuífero, cuya base son facies de margas y margocalizas poco permeables.

Figura 15. Aguada muy cercana a la localidad de Tizimín. El nivel piezométrico en esta depresión está varios metros por encima del nivel del acuífero regional.



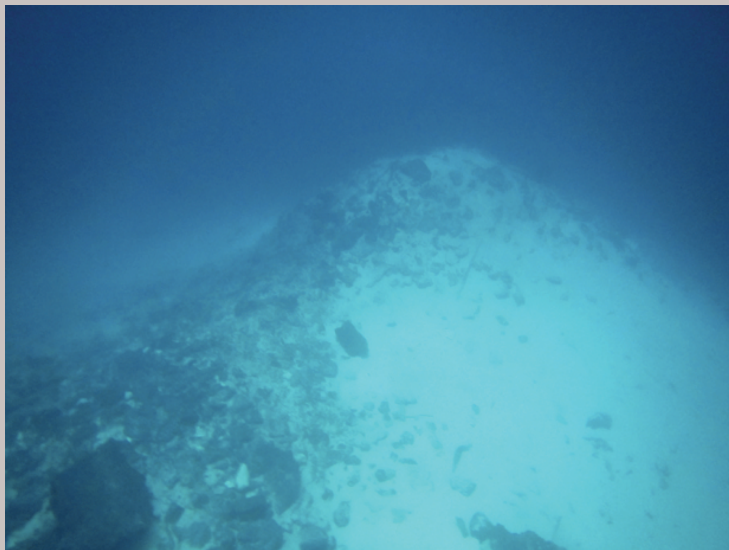
Entre el karst superficial, las aguadas y el endokarst se ubican los cenotes, que son depresiones cerradas que conectan el subsuelo y la superficie con carácter regional desde el punto de vista hidrogeológico (**Figura 16**). Podrían definirse, como ya hicieron los mayas, como la conexión entre nuestro mundo, la litosfera, con el inframundo, la hidrósfera. Por tanto, la representación del karst más famosa en Yucatán parece tener como mínimo un carácter funcional importante desde el punto de vista hidrogeológico, debido a que una gran parte del agua de precipitación y parte de la que discurre por la superficie se infiltra a través de estos grandes huecos.



Figura 16. *Imagen de un cenote cuyo nivel piezométrico coincide con el nivel freático regional del acuífero. En la parte superior puede observarse la abertura del techo, consecuencia del colapso, y algunos conjuntos de estalactitas. En sus márgenes, las paredes de la cámara principal, con una estratificación muy bien definida, y en la base, el cono de bloques desprendidos.*

Estamos, por tanto, en una forma mixta entre el exokarst y el endokarst, pero con una serie de elementos comunes como la geometría, la relación con la distribución de facies, las fallas y fracturas, presencia de agua en su interior y un cono de grandes bloques, consecuencia del colapso del techo de la cavidad (**Figura 17**). Los cenotes han sido descritos por muchos autores como estructuras circulares con diámetro y profundidades diferentes; sin embargo, de acuerdo con los resultados obtenidos en diversos estudios sobre el terreno, parece que nos encontramos ante estructuras más complejas que en detalle muestran diferencias, cuando menos, notables.

Figura 17. Detalle de un cono de bloques junto con arenas y sedimento detrítico autóctono, consecuencia del colapso del techo de la cueva.



Génesis y geometría de los cenotes

Las dolinas, en general, se forman por la disolución de la roca debido a la infiltración del agua de lluvia y el enriquecimiento de CO_2 en contacto con la vegetación. Suelen ser depresiones que en planta presenta formas circulares o semicirculares, y en sección, cónicas. Casi todas presentan un borde perimetral, un sumidero por donde se infiltra el agua, y, dependiendo de la fase en la que se encuentra, pueden tener un gran hueco o cavidad a modo de cámara (*chamber cave*) en su margen inferior, lo que daría formas en sección de reloj de arena. Sin embargo, los cenotes son estructuras que han superado ese estadio, ya que se trata de dolinas cuyo techo ha colapsado, se conocen en la literatura como dolinas de colapso o *sinkhole*.

Este último aspecto es muy importante para entender su génesis, que indica que ha habido un periodo de tiempo durante el cual se ha formado una gran cámara en el subsuelo, pero que una vez que los estratos superiores no soportaron su peso, colapsaron (**Figuras 16 y 17**).

El proceso mecánico de colapso de cavidades es un aspecto importante de muchos de los sistemas kársticos que puede ayudar a entender la evolución de las estructuras como los cenotes. El marco teórico del fenómeno se corresponde con el hundimiento de paredes y techos de las cavidades bajo la presión generada por el peso de los estratos suprayacentes. La zona de máximo esfuerzo está normalmente inducida

por la presencia de un vacío (cavidad) (White, 1988), donde la presión es cercana a cero. Como resultado se produce un domo de fracturación por un desajuste de tensiones alrededor de la cavidad (Davis, 1949; White y White, 1969; Bögli, 1980; Ford y Williams, 1989) (**Figura 18**). Los domos de fracturación, consecuencia del desplome del techo y, ocasionalmente, de las paredes de la cavidad, se forman por lo general en la zona vadosa, cuando el nivel freático ha descendido, vaciando totalmente o en parte la cavidad. Este hecho origina una reorganización de las líneas de esfuerzo preexistentes en la roca, ligada a la descompresión que se genera en la cavidad y que varía en función del tamaño de la misma y el peso de los depósitos suprayacentes. Posteriormente, las paredes y los techos de las cavidades que soportan mayor tensión se rompen y colapsan, en muchas ocasiones, por la disminución de la presión hidrostática, hasta alcanzar un perfil de equilibrio entre las tensiones y el vacío de la cavidad (Davis, 1949; White y White, 1969; White y White, 2000; Bögli, 1980).

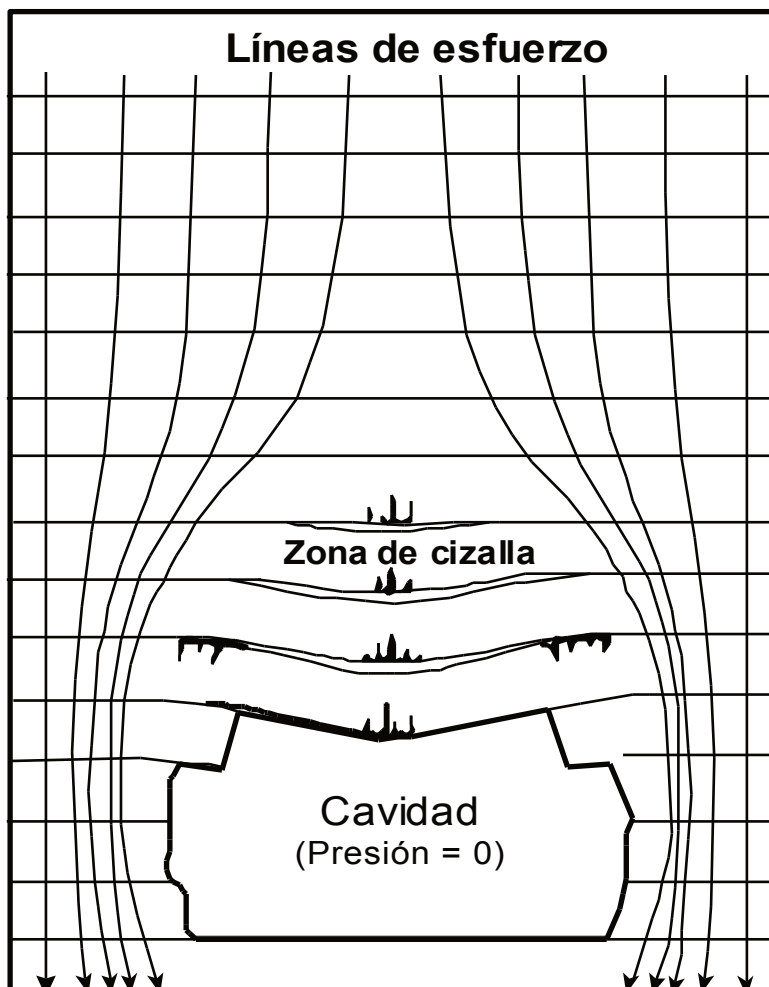


Figura 18. Reorganización de las líneas de esfuerzo en la roca por la descompresión de un vacío (cavidad) (Ford y Williams, 1989).

Esta simplificación del proceso está determinada en el detalle, por diversos factores de control, como la litología, el grado de litificación de la roca y las características litoestratigráficas (componentes, tamaño de los estratos suprayacentes y posición de los planos de estratificación). Si los procesos se producen en plataformas carbonáticas de tipo arrecifal recientes, como en el caso de la península de Yucatán, tanto los procesos de disolución como los desequilibrios de las líneas de tensión y su posterior reajuste mecánico suelen ser muy rápidos. Sin embargo, el colapso se puede producir también en un ambiente freático (Loucks, 1999; Robledo, 2005) o submarino (Pedley 1975; Pedley, 1990; Robledo y Pomar, 2000a, Robledo y Pomar, 2000b; Robledo y Pomar 2001; Robledo, 2005), donde a los factores de control anteriores se añaden la presión hidrostática relativa o el peso que ejerce la columna de agua marina sobre la cavidad. En el último caso, además de formas como las que se han descrito anteriormente, son determinantes los procesos de sin-sedimentación, ya sea en las capas del techo de la plataforma o en el relleno total o parcial de la cavidad. El menor grado de litificación de la roca que en las plataformas consolidadas (donde sedimentos posteriores pueden rellenar la cavidad) determina un sistema muy característico, donde las capas suprayacentes afectadas definen perfiles de acomodación sedimentaria coetáneos al colapso y/o deformaciones semiplásticas generando formas similares a pequeñas inflexiones o pliegues (Robledo, 2005). Estos aspectos permiten diferenciar sistemas paleokársticos sin-sedimentarios de otros posteriores, en los cuales la roca ya está completamente litificada.

Loucks (1999), basándose en las descripciones de White y White (1969) y Ford y Williams (1989), definió una función de relación entre el espesor de los estratos sobre la cavidad y la longitud del vacío (para rocas fracturadas y no fracturadas), como factores que determinan el hundimiento. Con el aumento del espesor de los estratos, es mayor la longitud necesaria sobre la cavidad para que colapsen y viceversa. Si los estratos están fracturados, a igualdad de longitud de vacío, es necesaria una potencia mayor de los estratos suprayacentes. Según el resultado de la función y su representación gráfica, con espesores inferiores a 4 m y longitudes superiores a 15 m, las capas suprayacentes que no presentan fracturación tiene menos probabilidad de hundirse. Entre estos parámetros máximos, se pueden dar distintas combinaciones, dependiendo de la mayor o menor fracturación de la roca, de la extensión y del espesor de los estratos suprayacentes. No obstante,

esta función de relación omite la geometría de la cavidad, parámetro decisivo para el proceso y forma de una estructura de colapso.

En el caso de los cenotes y según el modelo genético que se discutirá posteriormente, los hundimientos parecen estar ligados a la generación de una cavidad en la zona del límite de la capa freática. Este aspecto es determinante y refleja un factor a tener en cuenta, como es la constatación de que en muchos cenotes sólo se ha observado un cono de derrubios de bloques muy grandes por debajo del agua, pero ninguna estalagmita (**Figura 17**). Un segundo factor es el diámetro de la cavidad, en menor medida, la geometría de la misma, y sobre todo, el peso de las capas suprayacentes.

De estos aspectos, se deduce algo muy evidente y es que cenotes de mayor dimensión están relacionados con cavidades o cámaras endokársticas de mayores dimensiones. Sin embargo, surge una pregunta: ¿se han formado todos los cenotes al mismo tiempo y en las mismas condiciones ambientales e hidrogeológicas? En apartados posteriores intentaremos resolver esta duda.

Modelo genético de los cenotes en la península de Yucatán

El modelo genético de los cenotes, desde el punto de vista hidrogeológico, está determinado por las oscilaciones del nivel piezométrico. Si el proceso de colapso de una dolina parece estar relativamente claro, la génesis de los cenotes en su conjunto no. Lo único evidente es que estas estructuras son consecuencia del hundimiento del techo de una gran cueva o cámara, pero se ha constatado sobre el terreno que algunos cenotes están ligados a fallas y fracturas, otros no. Además, como ya se ha mencionado, muchos cenotes tienen en su techo estalactitas, pero en el suelo y por debajo del nivel freático no hay estalagmitas u otras formas de goteos que deberían estar si las condiciones hidrológicas del suelo de la cueva indicaran eventos secos o sin agua.

El desarrollo de cavidades y colapso se ha descrito ampliamente como fenómenos producidos en etapas correlativas de tiempo, siendo el colapso un fenómeno crítico que se produce de forma súbita (Cargile, 1969; Pedley, 1975; Craig, 1988; Loucks y Handford, 1992; Mazzullo y Mazzullo, 1992; Canter *et al.*, 1993; Demiralin *et al.*, 1993; Willson *et al.*,

1993; Loucks, 1999; Robledo, 2005). Los cenotes de la península de Yucatán están relacionadas con un marco general donde en un principio tuvo lugar la disolución de la roca carbonática (con el subsiguiente desarrollo de cavidades) y, posteriormente, el colapso de las capas suprayacentes. El desarrollo de las cavidades en forma de grandes cámaras se produce en una primera fase, donde las fluctuaciones del nivel piezométrico son el mecanismo de control y formación de grandes huecos. Podemos diferenciar dos grandes fases en la ocurrencia de estas formas: (1) subida del nivel freático y nivel freático alto, desarrollo de cuevas; (2) bajadas del nivel freático y nivel freático bajo, colapso del techo de las cuevas. Sin embargo, su génesis responde también a otros aspectos concretos y más complejos, entre los que destacan: a) la arquitectura de facies y b) las fallas y fracturas.

Los resultados, en términos generales, del análisis de la arquitectura de facies y de los modelos deposicionales en la plataforma de la península de Yucatán, señalan que los de disolución y colapso están inducidos, primero por la arquitectura de facies de esta plataforma, así como el nivel de base y por las alternativas exposiciones subaéreas de las facies arrecifales.

Figura 19. *Detalle de un fragmento de coral fósil observado en el talud de la carretera Mérida-Valladolid.*



La relación entre los procesos de hundimiento y la arquitectura de facies está determinada por las diferentes secuencias y órdenes de secuencia específicos de los ciclos de nivel del mar que se definen con base en los cambios característicos en las facies. De las unidades observadas, de

acuerdo con las oscilaciones marinas, hay dos grandes sistemas cuyos límites todavía no han sido establecidos sobre el terreno en la península: a) los sistemas agradantes, que corresponden a la subida más rápida del nivel del mar y volumétricamente los más importantes en cuanto a litofacies. Estos sistemas están caracterizados por el desarrollo de un arrecife coralino, tipo barrera, y potentes depósitos, sin retrogradación, de todos los sistemas deposicionales, *lagoon* externo, interno y medio. Este sistema de deposiciones arrecifal, con sus correspondientes cinturones de facies, parece tener varios ciclos en la península. El segundo de los sistemas es el progradante, ligado fundamentalmente a depósitos de barrera arrecifal menos potentes, así como lagunas de poca entidad. Estos ciclos sólo pueden relacionarse con la progradación del arrecife acuñándose a cuenca (**Figura 20**).

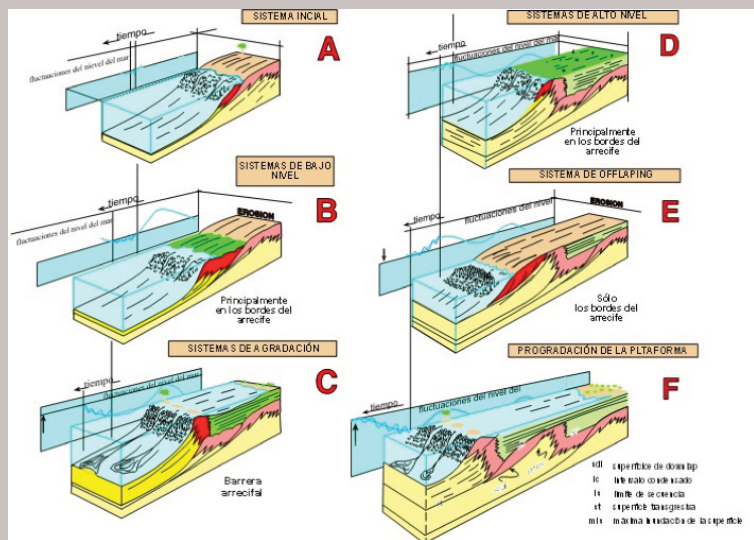
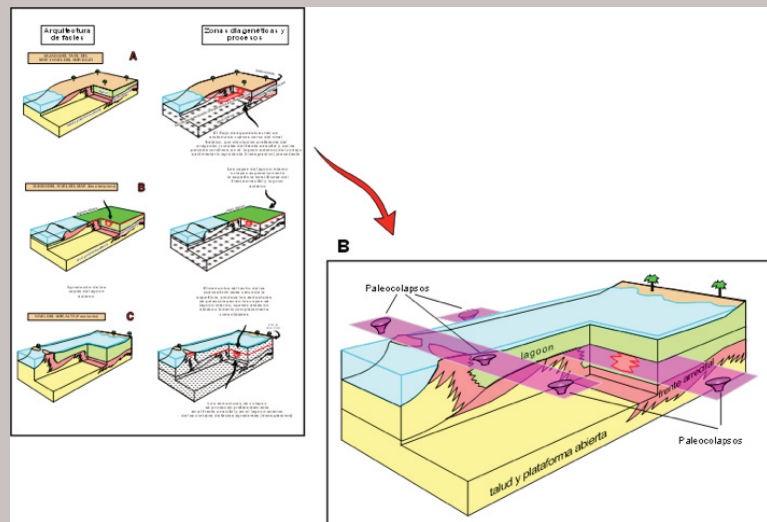


Figura 20. Modelo genético análogo del sistema deposicional de los cinturones de facies arrecifales en la península de Yucatán (modificado de Robledo, 2005).

Una vez identificados algunos de estos cinturones de facies de la Plataforma de Yucatán, ésta se puede correlacionar con la propia distribución de los cenotes. Por lo tanto, un primer factor de control se puede explicar en la distribución de corales del frente arrecifal y el *lagoon* externo. Los corales son elementos compuestos por estructuras carbonáticas muy solubles y, en consecuencia, son zonas preferentes de disolución. Durante las bajadas del nivel del freático (coincidentes con el nivel del mar), en la zona más continental de la interfase de agua dulce y salada (o agua dulce de diferentes químicas), la infiltración de aguas meteóricas o la alternancia de ambos procesos creó un sistema de cavernas cerca del nivel freático, por disolución preferente del aragonito (principalmente en los corales) en las facies del frente arrecifal y parches

coralinos de las facies de *lagoon* externo (**Figura 21**). Dichas cuevas se desarrollaron a poca profundidad y cerca de la superficie del nivel freático del acuífero. Durante el ulterior ascenso del nivel freático produjo grandes cámaras subterráneas, hasta que las capas suprayacentes colapsaron. El hundimiento, por tanto, se produjo como consecuencia del desplome del techo de las cuevas, anteriormente formadas en el núcleo arrecifal y en los parches coralinos.

Figura 21. A) Modelo genético de los colapsos kársticos. B) Síntesis del modelo genético y la posición de los colapsos en relación con la arquitectura de facies.



Un claro ejemplo que apoya esta génesis de los colapsos y los factores de control se presenta en la **Figura 22**, donde la distribución de cenotes está ligada al frente arrecifal y al *lagoon* externo, como muestran los corales observados de edades del Mioceno y Cuaternario (**Figura 19**). Con más detalle se observa esta misma relación en los estados de Campeche, Yucatán y Quintana Roo (**Figuras 22, 23 y 24**). No obstante, el carácter litoestratigráfico de la Plataforma de Yucatán no lo explica todo, ya que un número importante de cenotes se ubican sobre la formación del Eoceno, en la que no existen evidencias de un sistema arrecifal, además de que los materiales son más antiguos que los del Mioceno y Cuaternario, donde se ubica parte del famoso Anillo de Cenotes (**Figuras 22, 23 y 24**). Por tanto, un conjunto de cenotes, aparentemente menos numeroso, no responde a una relación geológica clara con una plataforma arrecifal, además, tiene continuidad geológica entre distintos materiales y facies, como se puede observar en las **Figuras 22, 23 y 24**. Por tanto, debemos atender a otros factores de control como las fallas y fracturas.

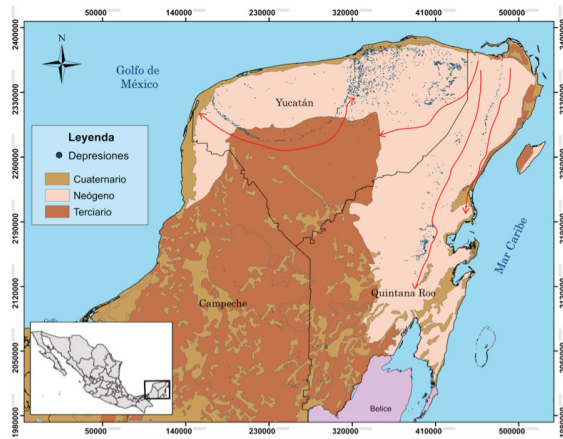


Figura 22. Relación entre la distribución litoestratigráfica y los cenotes en la península de Yucatán en el sector del Estado de Campeche.

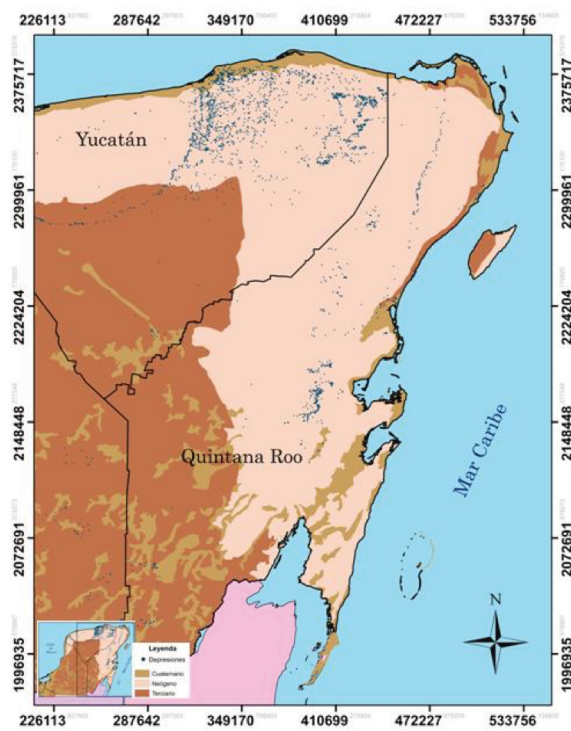


Figura 23. Relación entre la distribución litoestratigráfica y los cenotes en la península de Yucatán en el sector del Estado de Quintana Roo.

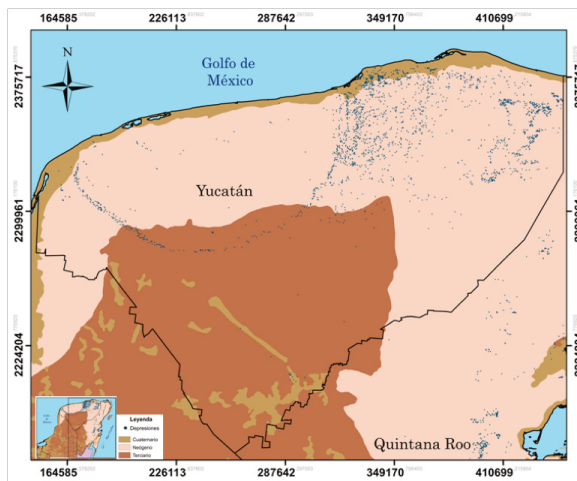
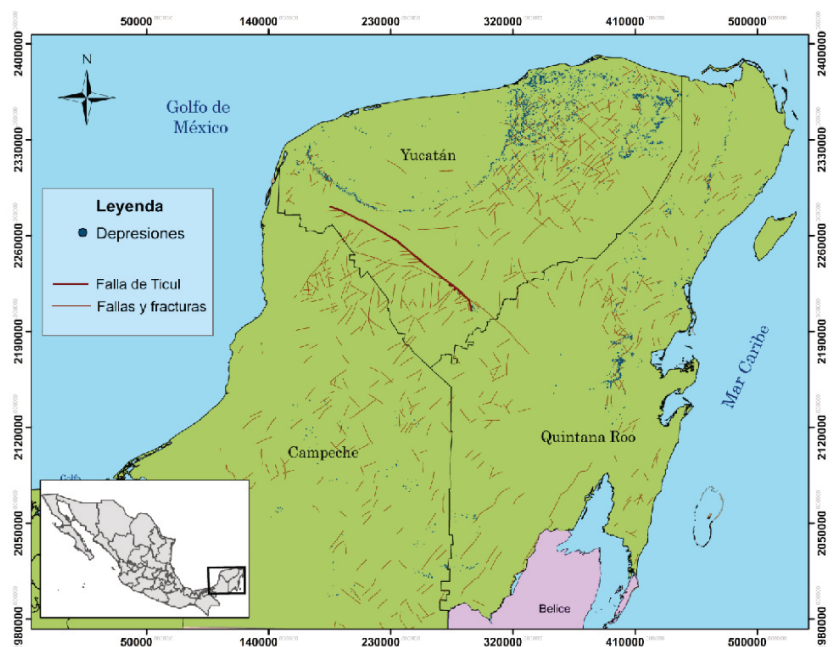


Figura 24. Relación entre la distribución litoestratigráfica y los cenotes en la península de Yucatán en el sector del Estado de Yucatán.

Las fracturas son otros elementos que en un karst determinan la evolución y distribución de formas típicas de terrenos kársticos. En este caso, las fracturas parecen también ser un factor de control de la distribución de cenotes. En la península de Yucatán, el trabajo realizado a partir de Weidie (1985), SGM (2007), Perry *et al.*, (2009), Bauer *et al.*, (2011) y Bautista y Palacio (2011) pone de manifiesto que parece existir una relación entre la distribución de las fallas y fracturas, y la ubicación de los cenotes. En la **Figura 25** se observa cómo en términos generales afloran cenotes ligados a un conjunto de fracturas NO-SE y NE-SO, de especial interés en el estado de Yucatán, al este del Anillo de Cenotes (la falla de Ticul tiene una dirección NO-SE) y en la zona central este y sur del estado de Quintana Roo, la laguna de Bacalar es una gran falla con dirección NE-SO (**Figura 26**).

Figura 25. Relación entre la distribución litoestratigráfica y los cenotes en la península de Yucatán.



Aunque el factor estructural ha jugado un rol determinante en el karst de la península de Yucatán, los mapas de detalle muestran que muchos conjuntos de cenotes se agrupan en lugares donde no se han observado numerosos conjuntos de fallas y fracturas. Es especialmente interesante la zona del Anillo de Cenotes donde apenas hay fracturas y fallas, aunque sí se han observado algunos cenotes, tanto en el perímetro como en el interior del mismo (**Figura 27**). Destaca también, cómo a lo largo de todo el perímetro de la falla de Ticul, no se ha observado ningún cenote (**Figura 25**), siendo esta falla la que determina gran parte de la morfoestructura de la península de Yucatán. Y esa misma relación existe en zonas como el sector norte y sur de Quintana Roo (**Figura 26**).

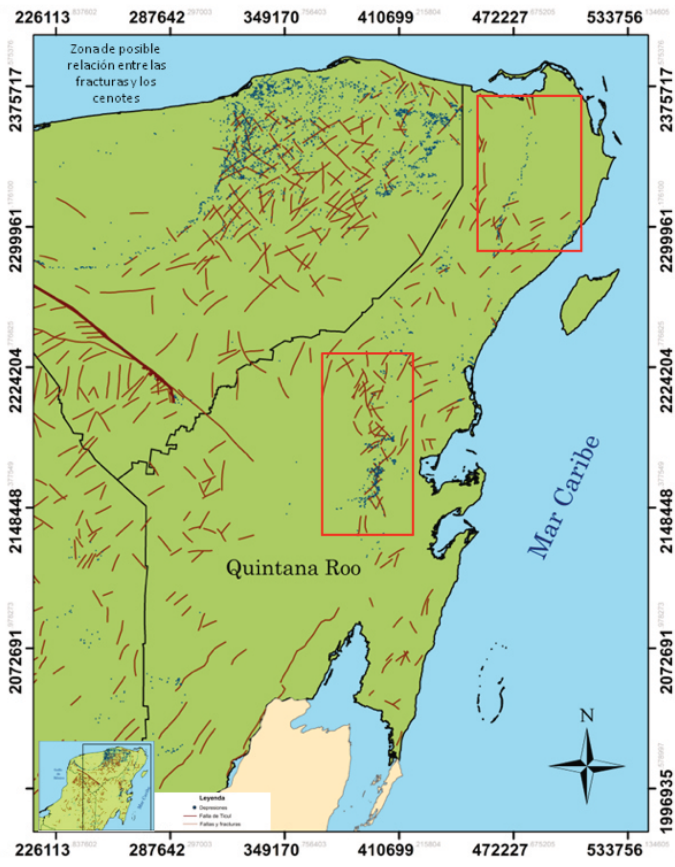


Figura 26. Relación entre la distribución de fallas y fracturas y los cenotes en el estado de Quintana Roo. El recuadro superior derecho señala una zona sin relación aparente con las fracturas y, el inferior, una clara relación con éstas.

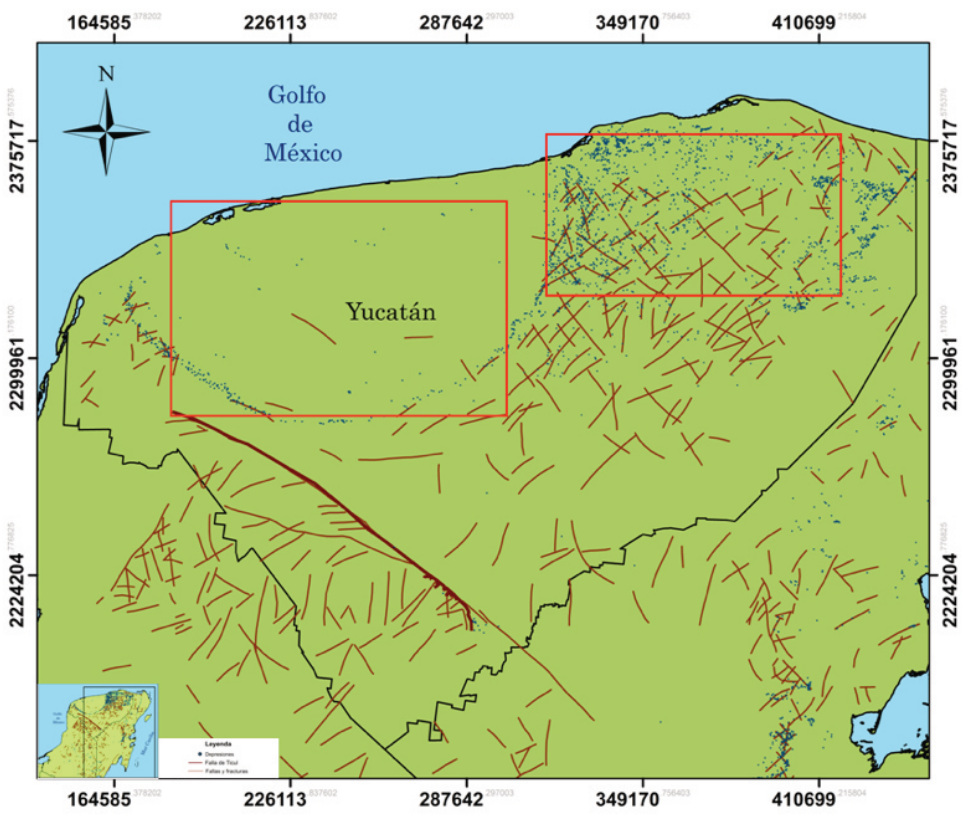


Figura 27. Relación entre la distribución de fallas y fracturas, y los cenotes, en el estado de Yucatán. El recuadro superior izquierdo señala una zona sin relación aparente con las fracturas y el derecho, una clara relación con éstas.

Figura 28. Relación entre la distribución de fallas y fracturas y los cenotes en el estado de Campeche. El recuadro izquierdo señala una zona sin relación aparente con las fracturas y, el derecho, una clara relación con éstas.

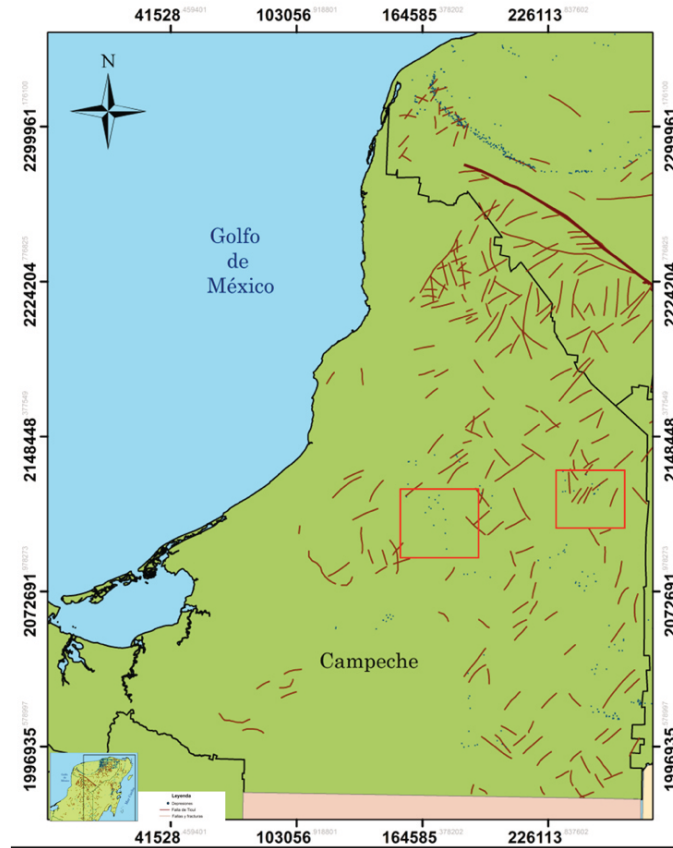
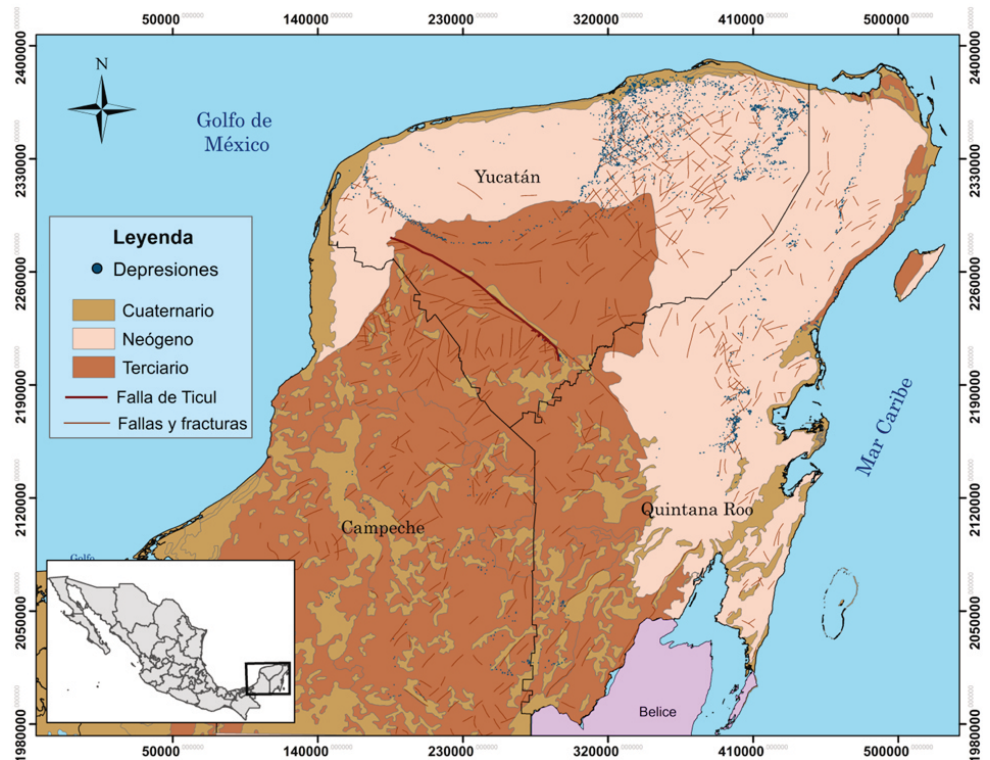


Figura 29. Relación entre la distribución litoestratigráfica, las fracturas y los cenotes en la península de Yucatán.



El estudio de ambos factores, litología y fracturación por separado, no ha supuesto un avance manifiesto en sí mismo, ambos por separado parecen haber jugado un control en la formación de estas depresiones, por lo que se ha optado por cruzar el mapa geológico y estructural junto con la distribución de cenotes (**Figura 29**). Esta correlación ha permitido observar varios aspectos muy interesantes. El primero pone de manifiesto que existe, en cuanto al número, por lo menos, un claro control litológico de los cenotes, ubicándose la gran mayoría en las zonas de rocas del Mioceno, Plioceno y Cuaternario (formación Carrillo-Puerto y formaciones cuaternarias de calcarenitas) y, por tanto, ligados a un sistema arrecifal Mioceno y/o Plioceno y, probablemente a paleoplayas. La segunda es que las fracturas están ligadas a la distribución de cenotes, pero también lo hacen especialmente en las zonas representadas por rocas carbonáticas arrecifales del Neógeno. Sin embargo, en la zona de Campeche, la relación no es tan clara ni con las fracturas ni con la litología, ya que los materiales del Eoceno son calizas masivas de plataforma marina, formaciones Petén y Pistén. Aunque en Campeche también se observa una importante extensión de afloramientos cuaternarios, éste no parece ser un factor de control en la formación de los cenotes, ya que éstos lo hacen indistintamente entre las rocas de edad Eoceno o Pleistoceno (**Figura 30**).

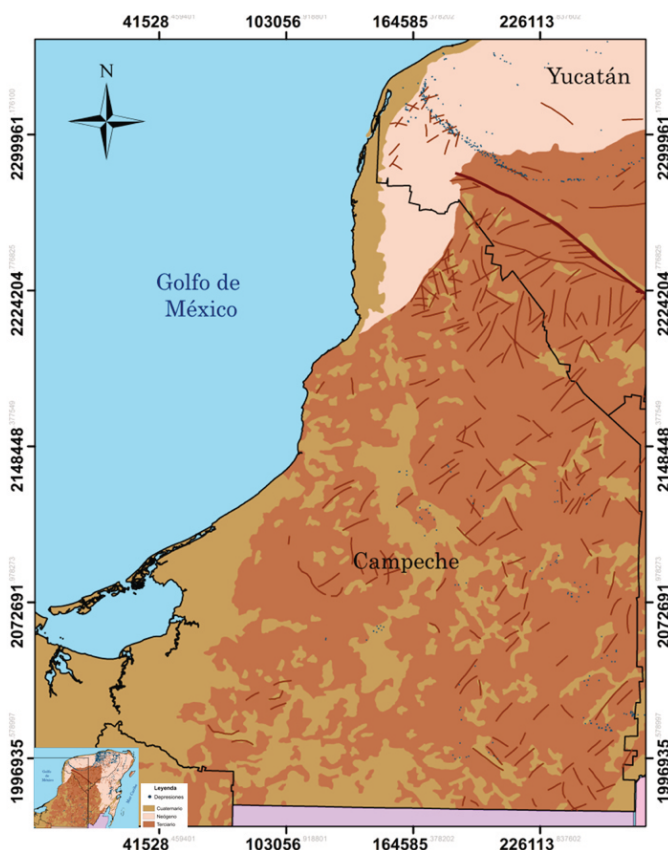


Figura 30. Relación entre la distribución litoestratigráfica, las fracturas y los cenotes en el estado de Campeche.

La edad de los cenotes y su relación hidrogeológica

Una vez analizadas las relaciones geológicas que existen en la distribución espacial de los cenotes, volvamos a la pregunta que nos hacíamos al inicio: ¿qué edad tienen los cenotes?, ¿hay cenotes más antiguos y más modernos? Aunque la Geología puede determinar la edad de la roca, esto no determina la edad de un proceso geomorfológico como es el karst. Obviamente, mientras más antigua sea la roca, más probabilidades tiene de haber sufrido procesos geomorfológicos, al haber estado expuesta a todo tipo de condiciones. Sin embargo, también pueden existir rocas muy antiguas en las que no se hayan formado cenotes y otras muy modernas en las que éstos afloran masivamente. En el caso de la península de Yucatán, la edad de los cenotes, de acuerdo con el repaso geológico e hidrogeológico, parece estar más estrechamente relacionada con este último. Esto es: una vez constituida la península tal y como la conocemos hoy, probablemente ya durante el Pleistoceno, existió una dinámica hidrogeológica a escala regional en toda la península que determinó, entre otras cosas, la formación de depresiones cerradas. Esto significa que existen extensos flujos de agua regionales, un nivel piezométrico también regional a nivel de península, sin descartar bloques de acuíferos individualizados, acuíferos colgados o acuitardos suprayacentes más pequeños, con su propia dinámica local, y, por supuesto, en las que pueden haberse desarrollado cenotes o, en el caso concreto de la península, agudas.

Este marco hidrogeológico general de la península de Yucatán determina tres aspectos muy importantes en la formación de los cenotes: a) la influencia de las fluctuaciones del nivel piezométrico del acuífero, b) la influencia de la interfase agua dulce-agua salada en las zonas del acuífero limítrofes con el mar y c) la química del agua, pudiendo ser más o menos agresiva, por tanto, con más capacidad de disolución. Todos estos aspectos son importantes en la formación de los cenotes, pero ninguno nos indica la edad para diferenciar, en caso de que existan, cenotes más antiguos o más modernos. Si atendemos a otros elementos, por ejemplo, la presencia o ausencia de espeleotemas en la base de los cenotes, podemos deducir, al menos, un aspecto. En aquellos cenotes en los que hay presencia de estalactitas, pero no hay estalagmitas, el nivel piezométrico nunca ha estado por debajo del suelo actual del cenote. Sin embargo, este hecho sólo indica que, muy probablemente, estos cenotes tienen mayor profundidad y se encuentran más hacia el interior, pero no indican su edad. No obstante,

si tratamos estas formas como depresiones cerradas, sí existen algunos elementos de juicio que nos permiten hacer una primera diferenciación preliminar, respecto a su edad:

- a) Depresiones tipo dolinas en las que todavía no se ha colapsado el techo. Se ubican en la formación Carrillo Puerto y son muy numerosas en la zona de Tizimín. Se trata de las más modernas.
- b) Depresiones individuales en las que el techo ha colapsado, por tanto, ya pueden definirse como un cenote.
- c) Grandes depresiones, poljes y uvalas, que implican coalescencia de cenotes y/o desarrollo a partir de una tectónica activa. Son probablemente las más antiguas.

Esta tentativa de clasificación, sin embargo, muestra que no existe un patrón claro entre su distribución espacial y su edad en la península de Yucatán, ya que ubicadas entre las primeras (más recientes) y las últimas (más antiguas), se ha observado la presencia de cenotes. Algunos incluso por debajo del nivel del mar actual como el *Blue Hole* de Belice (**Figura 31**), geológicamente enmarcado dentro de la península de Yucatán. La laguna de Bacalar es también un buen ejemplo de esto, así como de la clara influencia de la hidrogeología regional en la formación de los cenotes, más allá de la que han tenido las fracturas y la litología.



Figura 31. Blue Hole de Belice, un cenote actualmente inundado por el mar, lo que indica una subida del nivel regional del mismo.

Reflexiones finales

Los resultados de estos primeros avances en la génesis de los cenotes muestran que son la causa directa de la disolución de rocas carbonáticas muy solubles, ligadas a tres claros factores de control en su ámbito "terrestre": 1) la distribución litoestratigráfica relacionada principalmente con una plataforma arrecifal; 2) la distribución de fallas y fracturas derivada de una tectónica relativamente reciente; 3) la dinámica hidrogeológica regional y local en uno de los acuíferos kársticos más grandes del planeta. Desde este punto de vista, surge la pregunta "extraterrestre": ¿qué influencia ha tenido el impacto del meteorito en la formación de los cenotes?


Perry *et al.* (1995) relacionaron la formación del Anillo de Cenotes con cambios en la permeabilidad y el flujo de agua subterránea, en la que ya apunta a la relación con las fracturas y fallas post-miocenas y al desarrollo de arrecifes coralinos sobre el borde del cráter durante el Paleoceno. No obstante, como hemos detallado anteriormente, ni una litoestratigrafía determinada ni la fracturación están siempre ligadas al desarrollo de cenotes. Aunque sí parece existir una relación causal entre ciertas formaciones y el desarrollo de un mayor número de cenotes. De igual forma sucede con las fracturas y fallas, pero no parece que ambos hechos por sí solos deban estar necesariamente ligados al impacto del meteorito. De hecho, aunque el Anillo de Cenotes presenta un borde densamente poblado por depresiones que dibuja una geometría semicircular en su interior y circular en su exterior, se ha constatado la presencia de cenotes, en algunos casos con densidades muy importantes, como la zona denominada "la viruela". Lo mismo sucede con toda la zona sur y sureste de Campeche y, sobre todo, en Quintana Roo, fuera de la hipotética área de influencia del impacto del meteorito y del cráter de Chicxulub. Sin embargo, a nadie se le escapa que la geometría que dibujan los cenotes en la zona del impacto sí presenta un claro borde geométrico, el cual coincide con el área del impacto, por lo menos en su forma en planta. Esto abre de nuevo las incógnitas de la causa-efecto del impacto del meteorito y los cenotes.

El repaso de todos los factores de control relacionados con el desarrollo de los cenotes y la influencia del impacto del meteorito que originó el cráter de Chicxulub sí pueden tener una relación, al menos indirecta, a nuestro juicio. La edad de los materiales en los que se han formado los cenotes varía entre 45 millones de años y unos pocos miles, más de

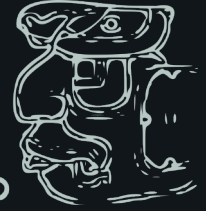
20 millones de años después de que el meteorito impactó en la zona de Chicxulub. Este aspecto pone de relieve que el desarrollo de la plataforma de Yucatán sí pudo estar condicionada por la colisión del bólido extraterrestre, dando lugar a las condiciones estructurales, paleogeográficas e incluso ambientales necesarias para la deposición de los materiales que hoy constituyen la geología de la península yucateca. Este hecho es básico, ya que sin estas condiciones previas, la presencia de un acuífero kárstico de estas dimensiones no se hubiera podido desarrollar y con él, los famosos y controvertidos cenotes. Desde el punto de vista geomorfológico e hidrogeológico, es decir, "terrestre", el proceso kárstico es el que da lugar a los cenotes y es la hidrogeología en su conjunto la que determina claramente, de una u otra forma, la formación de depresiones cerradas; pero también, y aun siendo de manera indirecta, el cráter de Chicxulub, producto del impacto, permitió un perfecto escenario.

En definitiva, meteorito, cráter, rocas carbonáticas, fracturas, arrecifes, agua y cenotes parecen estar en un complejo, pero armónico equilibrio que hoy en día nos permite disfrutar de una de las regiones más asombrosas y bellas del planeta.



 *Cenote Dzonot-Ilá, ubicado en el municipio de Abalá, Yucatán. En la parte superior y al fondo, pueden apreciarse las estalactitas bandera de más de 2 metros de altura. Buzos: Silvia Reyes y Héctor Torres. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*

OOOO



OOOO



OOOO



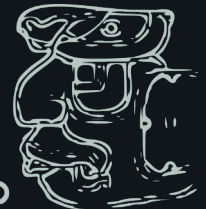
Capítulo 4

Las singularidades hidrogeológicas e hidrodinámicas del acuífero yucateco

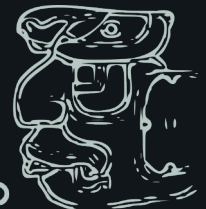
Ismael Sánchez y Pinto, Roger González Herrera

Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería.
Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología

OOOO



OOOO



OOOO



Introducción

El acuífero de Yucatán ha sido considerado como un sistema hídrico subterráneo altamente productivo y, al mismo tiempo, de una elevada vulnerabilidad a la contaminación. La extraordinaria conductividad hidráulica (horizontal y vertical) que le han conferido los procesos kársticos es la responsable de su productividad hídrica y lo hace más vulnerable. Los eventos tectónicos del pasado, así como un suceso catastrófico de naturaleza extraterrestre, son factores que conjuntamente con la naturaleza geológica de la roca, el clima, las transgresiones y regresiones marinas durante el Pleistoceno han influido en los procesos kársticos que han operado en el pasado geológico y aún están presentes, tanto en la superficie como en el subsuelo (Mendoza y Ortiz, 2000; Hildebrand *et al.*, 1991). Además de la productividad y vulnerabilidad del acuífero, los procesos kársticos que han operado en el acuífero también son responsables de la porosidad dual que caracteriza a éste y garantiza del comportamiento hidrodinámico complejo del mismo. Este aspecto condiciona, entre otros fenómenos, el flujo del agua subterránea y la intrusión marina que opera en este sistema.

El acuífero de Yucatán es libre en su mayor extensión, a excepción de la franja costera en donde la presencia de una delgada capa de caliche, de baja permeabilidad, confina al acuífero en su zona de descarga. Este confinamiento se prolonga hasta algunos cientos de metros mar adentro (Perry *et al.*, 1989). El acuífero está constituido por una capa de agua dulce que flota sobre agua salada, producto de la intrusión marina (Back y Lesser, 1981; Lesser y Weidie, 1988; SARH, 1989). El origen del agua subterránea lo constituye el agua pluvial, que en la época de mayor pluviosidad (de mayo a octubre) se infiltra al subsuelo recargando al acuífero. La zona de recarga al acuífero libre del estado de Yucatán está asociada a varios factores, tales como la elevada precipitación, el denso fracturamiento de la roca, la naturaleza del suelo, cuyo espesor varía espacialmente de cero a varias decenas de centímetros (del centro del estado hacia las costas litorales) y a algunos metros al sur y oriente de la capital. En este sentido, la principal zona de recarga se localiza en la planicie delimitada del noroeste al sureste, a partir de la base de la Sierrita de Ticul, región que corresponde a la planicie donde los suelos son delgados, la roca está altamente fracturada y se registra el área con mayor pluviosidad media anual. Se exceptúan las inmediaciones de la costa donde la precipitación es baja y el caliche que aflora es poco

permeable debido a que no está fracturado, lo que restringe la recarga en esta franja. Así, el agua de origen pluvial que ingresa al sistema fluye en forma radial de la base de la Sierrita de Ticul hacia las costas, hasta descargar al mar bajo un esquema confinante. El espesor de agua dulce es variable disminuyendo del interior del estado de Yucatán hacia las inmediaciones del litoral costero.

Para la administración de los recursos hídricos subterráneos, la CONAGUA (2009) ha dividido el estado de Yucatán en cuatro regiones hidrogeológicas (**Figura 1**). La disponibilidad media anual del agua subterránea es de 1361.6 Mm³, lo que hace un volumen de aproximadamente 900 m³ por habitante (Graniel, 2010). El agua subterránea en Yucatán es la principal fuente de abastecimiento para las distintas actividades de la población y, a su vez, el acuífero es receptor de las aguas de desecho que se generan en el estado.

Sin embargo, esta disponibilidad puede verse comprometida debido a los problemas de calidad a causa de la alta permeabilidad del suelo, lo que hace al acuífero muy vulnerable a la contaminación propiciada por la disposición de aguas residuales, fosas sépticas, aguas pluviales y factores como lixiviados de tiraderos o basureros municipales u otras actividades de origen antropogénico; asimismo, existen otras fuentes de contaminación, pero de origen natural como la intrusión salina en la franja costera o la presencia de yesos en algunas áreas del sur del estado (Graniel, 2010).

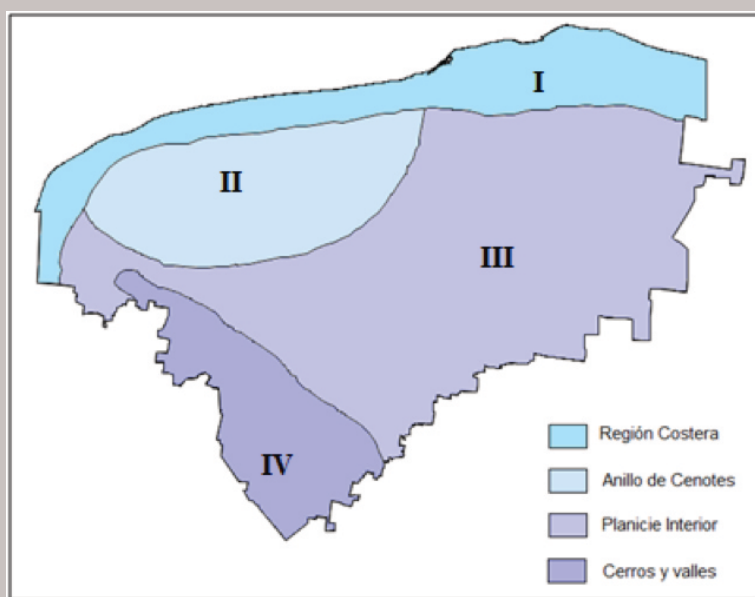


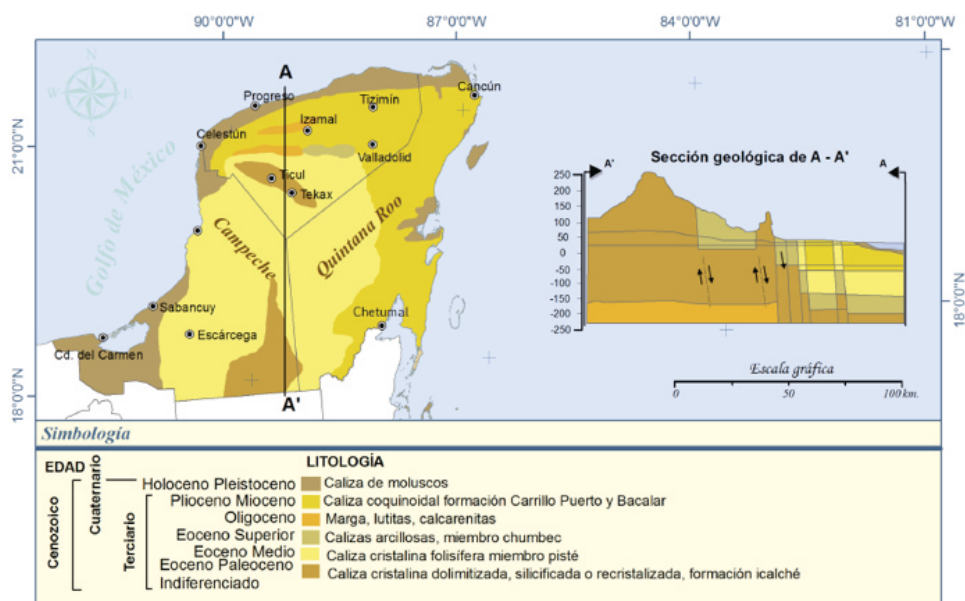
Figura 1. Regiones hidrogeológicas del estado de Yucatán. Modificado de CONAGUA (2009).

Geología

El subsuelo del estado de Yucatán está cubierto por rocas carbonatadas de edad Terciaria, principalmente calizas, de origen marino, que yacen casi horizontales con un débil buzamiento hacia el norte (Logan *et al.*, 1969; Isphording, 1975). El máximo espesor de estos sedimentos es de casi 1000 m y sobreyacen a carbonatos y evaporitas del Cretácico (Lesser y Weidie, 1988).

La cuenca marina en la que se depositaron estos sedimentos ha sido relacionada con la falla transformada que dio origen al Golfo de México (Steinich, 1996). Varios autores están de acuerdo en este movimiento rotacional que sufrió el bloque de Yucatán, separándolo del subcontinente norteamericano hasta adquirir su posición actual. No obstante, los modelos difieren en cuanto al centro rotacional y su movimiento (Steinich, 1996). El grueso espesor de la capa de evaporitas señala el fin del proceso de la falla transformada que originó esta cuenca estable (Tucker, 1985).

Figura 2. Mapa de la geología superficial de Yucatán y su secuencia estratigráfica (Villasuso & Méndez, 2000).



Evidencias geofísicas, estratigráficas y petrográficas indican la presencia de una estructura circular cuyo origen ha sido asociado a un cráter originado por el impacto de un meteorito en esta región, ocurrido probablemente hace 65 millones de años entre el Cretácico y el Terciario (Figura 3), (Hildebrand *et al.*, 1991).

Posterior a este evento, se depositaron sedimentos de origen marino cuyas edades están entre el Eoceno y el Cuaternario (**Figura 2**). Perry *et al.* (1995) y Marín (1994) sugieren que en el centro del cráter el sedimento tiene un espesor de 1000 m y, hacia sus límites, el espesor se reduce a 220 m. El Oligoceno ha sido reportado en el interior del cráter próximo a su frontera, pero más allá de la misma, está ausente (Perry *et al.*, 1995).

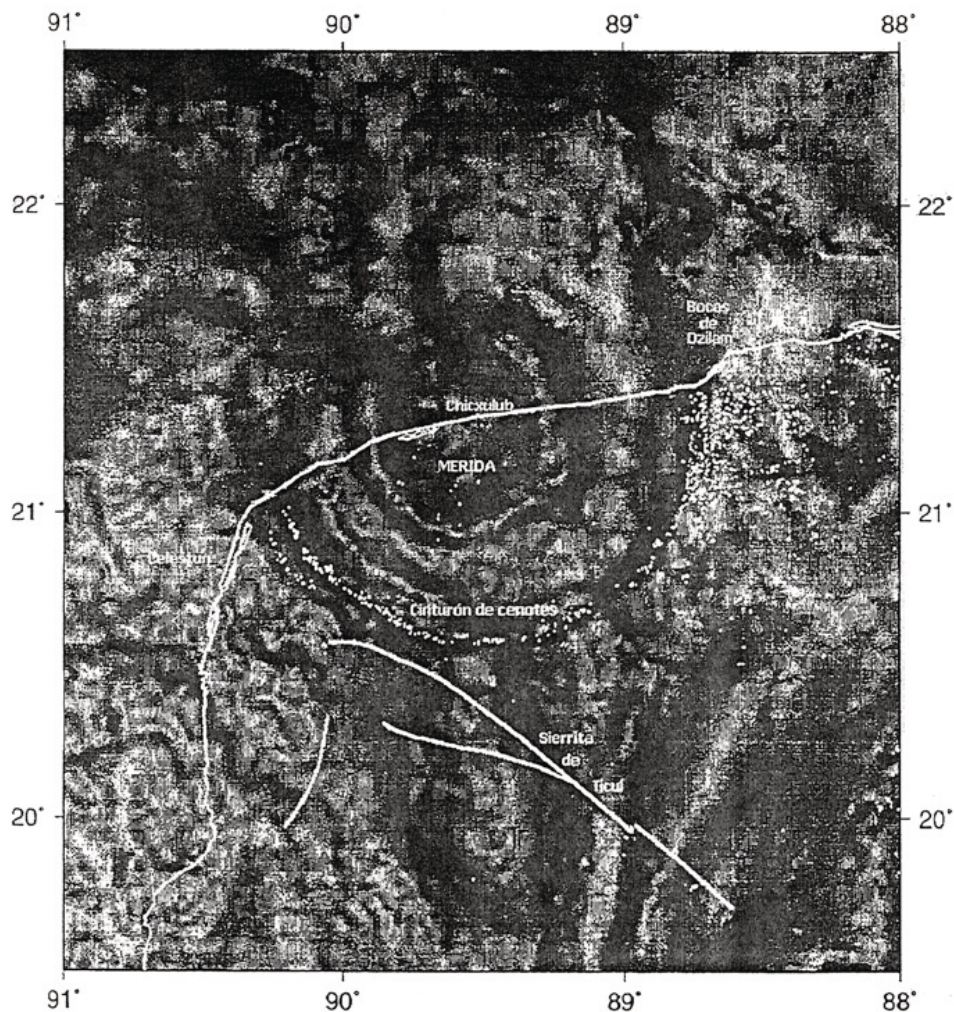


Figura 3. Estructura circular asociada a un cráter originado por el impacto de un meteorito hace 65 millones de años, (Hildebrand *et al.*, 1991).

Estratigráficamente las rocas más antiguas afloran hacia la porción sur y las más jóvenes, en dirección al mar (**Figura 2**). La secuencia geológica del estado de Yucatán está basada en ocho pozos perforados, a profundidades de hasta 3488 m, por Petróleos Mexicanos y ha sido descrita por varios autores (Bonet y Butterlin, 1962; Back & Lesser, 1981; López-Ramos, 1983).

Una densa capa de caliche muy fracturada y de espesor variable, no mayor de 3 m, se encuentra cubriendo gran parte de la superficie de la región en estudio. Los primeros 50 m de profundidad, debajo de la ciudad de Mérida, están constituidos por calizas fosilíferas que alternan con delgadas capas de calizas densas recristalizadas y margas calcáreas, probablemente equivalentes a la formación Carrillo Puerto. Estas delgadas capas de caliza recristalizada muy densa han sido interpretadas como caliche (Buckley *et al.*, 1994). La baja porosidad de estas capas ha sido inferida, con base en la elevada resistividad de las mismas. Buckley *et al.* (1994) creen que éstas estuvieron expuestas en la superficie, dando oportunidad a que los procesos que forman este tipo de roca estuvieran activos. La SARH (1989) reporta la presencia de gruesas capas de margas, lutitas y calcarenita coquinoidea pulvurulenta a profundidades de 150 m. Hacia el sur de Mérida, aflora un horizonte de calizas y calcarenitas pulvurulentas del Oligoceno, este tipo de roca se caracteriza por su baja permeabilidad. Pruebas de bombeo realizadas en esta zona, por consultores del agua subterránea, reportan abatimientos atípicos de algunos metros cuando se extraen 10 l/s.

Estructura geológica

La península de Yucatán forma parte de una gran plataforma calcárea casi plana y tectónicamente estable (Isphording, 1975). La falla normal denominada Sierrita de Ticul, a 70 km al sur de Mérida, y la estructura circular debido a un cráter de impacto de 180 km de diámetro con centro en la costa, al norte de la capital del estado, constituyen las estructuras geológicas más importantes en la región (**Figuras 2 y 3**).

La Sierrita de Ticul se extiende a lo largo de 160 km y 15 km de ancho en dirección N 55° W, y está constituida por calizas cristalinas, dolomitizadas y silicificadas del Eoceno inferior (Weidie, 1985, Lesser *et al.*, 1988 y SARH, 1989). Los movimientos que le dieron origen probablemente acaecieron entre el Cretácico superior y el Terciario inferior (Weidie, 1985). McClain (1997) estima que la falla se formó durante el Eoceno medio y a principios del Eoceno superior.

El sedimento depositado en la estructura circular del cráter de impacto sufrió asentamientos, originando un sistema de fracturamiento que posteriormente daría origen al cinturón o Anillo de Cenotes (**Figuras 3 y 4**), (Hildebrand *et al.*, 1995; Pope *et al.*, 1991).

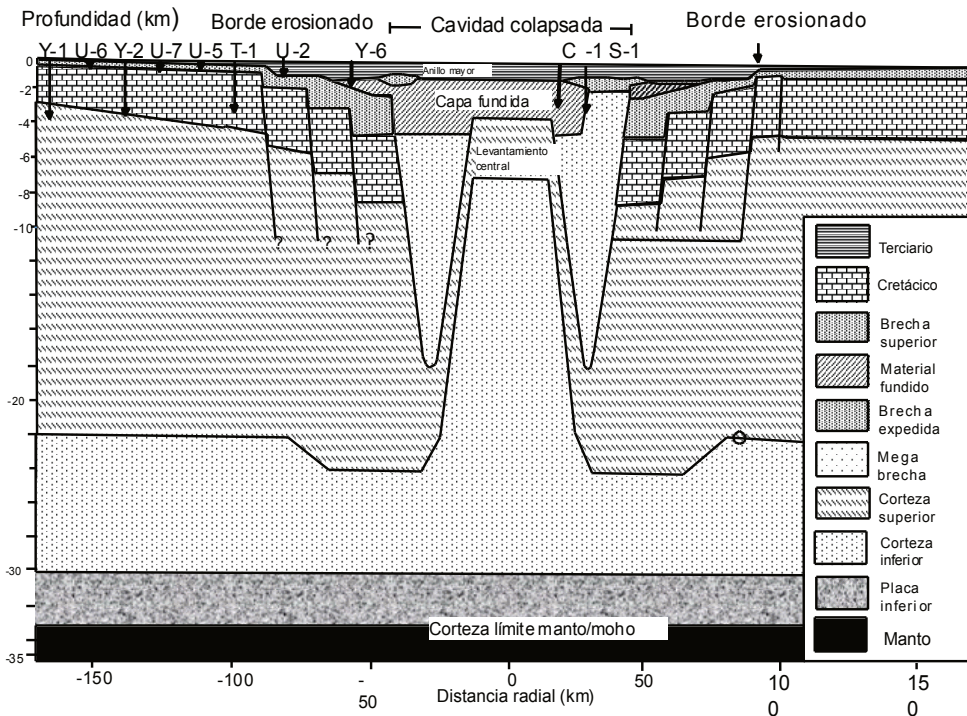


Figura 4. Esquema del modelo estructural del cráter de Chicxulub (modificado de Hildebrand et al., 1995).

La estructura de impacto y los movimientos tectónicos que dieron origen a la falla de Ticul han generado un sistema de fracturas, que aún no es bien entendido. La densa vegetación y lo plano del relieve limitan la aplicación de fotografías aéreas o imágenes de satélite para el estudio de este sistema. Sólo en el interior de cavernas, cenotes y pozos se pueden observar fracturas casi verticales a lo largo de las que se han desarrollado los fenómenos kársticos.

Hidrología

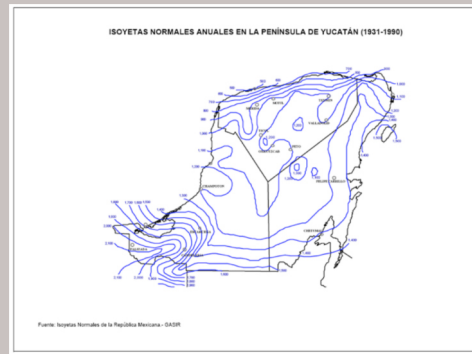
Un clima húmedo tropical prevalece en la península de Yucatán. El 85% de la precipitación anual se registra entre los meses de mayo a octubre, siendo los meses de noviembre a abril la temporada de menor precipitación pluvial. La precipitación media anual en el estado de Yucatán es de 1025 mm. Hacia el sur, ocurren las precipitaciones medias anuales más altas del orden de 1300 mm, disminuyendo gradualmente en dirección a la costa a valores de 500 mm (Figura 5). La temperatura media anual es de 26 °C, registrándose las mínimas entre diciembre y enero, y las máximas durante julio y agosto.

El relieve casi plano, la existencia de un suelo delgado y discontinuo y el fracturamiento de la roca caliza superficial son los factores principales que determinan la ausencia de corrientes superficiales en Yucatán. La infiltración del agua de lluvia ocurre en forma casi inmediata al evento, a

través de las fracturas de la roca superficial. De esta manera, entre el 15 y el 20% de la precipitación pluvial anual constituye la recarga neta al acuífero (Lesser *et al.*, 1988; SARH, 1989).

Morris *et al.* (1994), mediante un balance de masa del cloruro, estimaron que la recarga de origen pluvial es del orden del 9% de la precipitación media anual en las inmediaciones de la ciudad de Mérida. La evaporación potencial media es de 2255 mm/a. Las pérdidas de agua, que incluyen la evapotranspiración, intercepción por la vegetación, retención en el terreno y en la zona vadosa, representan el 80% de la precipitación anual (SARH, 1989).

Figura 5. Distribución de la precipitación media anual en el estado de Yucatán. Plano de isoyetas elaborado con estaciones pluviométricas con registros de casi 60 años (CONAGUA, 2015).



Hidrogeología cárstica

En virtud de las diferencias hidrogeológicas e hidrodinámicas, entre la zona costera y el acuífero más continental del interior del cinturón o Anillo de Cenotes, los conocimientos de la hidrogeología kárstica adquiridos en ambas zonas por diversos investigadores serán presentados por separado para una mejor comprensión.

Acuífero en el interior del Cinturón de Cenotes (AICC)

El agua subterránea en el acuífero de Yucatán se mueve de manera difusa a través de los intersticios granulares de la matriz rocosa, o bien, como flujos preferenciales que ocurren vía fracturas y/o conductos de disolución; dando lugar a un sistema acuífero denominado de *porosidad dual*.

La influencia hidrogeológica que el sistema kárstico tiene en la circulación del agua subterránea, a semejanza del acuífero de la ciudad de Mérida, también ha sido estudiada con mayor énfasis en el Cinturón de Cenotes (Marín, 1990; Steinich, 1996; Perry *et al.*, 1995). El Anillo de Cenotes es una

franja semicircular de aproximadamente 10 km de ancho, en donde la densidad de ellos, por km de longitud es de 1 a 3, existiendo tramos en los que están ausentes (**Figura 3**). Marín (1990) postuló que el cinturón funciona como un sistema de elevada permeabilidad por el cual circula el agua subterránea hasta ser descargada en los puntos de intersección del Anillo con el mar. La presencia de manantiales y la ausencia de dunas de arenas en los puntos de descarga, así como limitadas evidencias hidrogeológicas lo llevaron a sustentar tal hipótesis.

El método de resistividad azimutal ha sido empleado, en la porción sur del Cinturón de Cenotes, para determinar las direcciones de máxima permeabilidad (Steinich, 1996). Éstas pueden interpretarse como direcciones preferenciales de fracturas y cavidades kársticas.

Con base en el análisis conjunto de la información de las direcciones de máxima permeabilidad (Steinich, 1996) y en la topografía de 56 cavernas y cenotes, realizada por el Departamento de Hidrología de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), entre las décadas de los ochenta y noventa), se realizó una estimación burda acerca de la anisotropía kárstica del sistema.

El 95% de las cavidades no inundadas topografiadas tuvo una longitud que varió de 15 a 96 m, siendo de 3000 m la longitud de la caverna más extensa. El gráfico muestra que existe una razonable correlación entre el mayor número de direcciones de máxima permeabilidad y las orientaciones de desarrollo preferencial de las cavidades de disolución. El mayor número de cavidades dentro de los cuadrantes NW y NE se orienta dentro de un amplio arco de circunferencia de 80° a 40° de abertura, respectivamente (**Figura 6**). Aunque el espectro de direcciones de desarrollo de cavidades es amplio dentro de cada cuadrante, si se considera el centro de dichos arcos como la dirección representativa de ese grupo, entonces se observa que el sistema de cavidades es casi ortogonal.

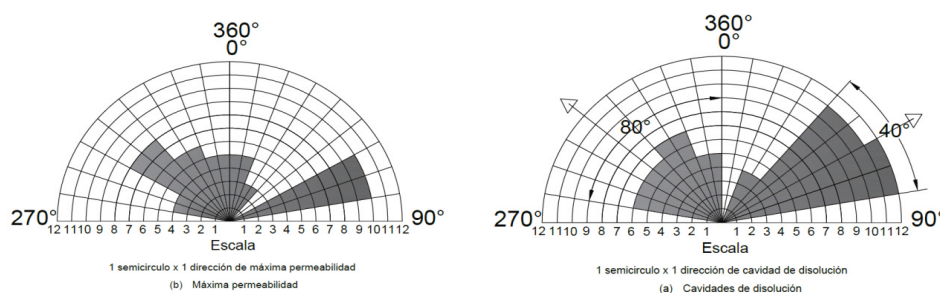


Figura 6. Roseta de direcciones preferenciales de cavidades kársticas y de direcciones de máxima permeabilidad.

La teoría sobre el origen de las cavidades kársticas propone que éstas se desarrollan sobre un lineamiento de fracturas y, debido a que la conductividad hidráulica secundaria de este sistema es consecuencia del fracturamiento y de las cavidades de disolución, entonces también sería válido suponer que la anisotropía de la conductividad hidráulica secundaria podría ser estimada burdamente en relación con el número total de cavidades orientadas en cada uno de los cuadrantes de la **Figura 6**. En otras palabras, si el mayor número de cavidades se orientan en cierta dirección, entonces es de esperarse que la conductividad hidráulica sea mayor en esa orientación, en una magnitud en proporción al número de cavidades orientadas en la otra dirección. Desde este punto de vista, se tiene que el número de cavernas con orientación NW es de 1.15 a 1.67 veces al número de cavidades orientadas con dirección NE.

Así, es posible que la anisotropía entre K'_x y K'_y sea de una magnitud del orden de $K'_y = (1.15 \text{ a } 1.67)K'_x$ en la dirección principal del tensor de conductividad hidráulica y con una inclinación entre 30° y 40° con respecto al eje de las abscisas del cuadrante NE.

El nivel piezométrico del agua subterránea en el acuífero de Yucatán varía de acuerdo con factores tales como la presión atmosférica, a la época de precipitación pluvial, a la descarga natural del acuífero hacia el mar, a los efectos antropogénicos como la recarga inducida, o bien, las extracciones del agua subterránea y el régimen de mareas. Sin embargo, sólo a estos cuatro últimos factores se les ha puesto atención en los estudios del agua subterránea en el estado de Yucatán. No obstante, existen otros factores ajenos al balance hídrico de los acuíferos como los arriba mencionados, que también influyen en la variación del nivel piezométrico, pero que están vinculados con las características hidrogeológicas de los acuíferos kársticos como la presencia de fracturas, cavidades de disolución, cavernas y diferencias litológicas que influyen en la facilidad con la que el agua puede transmitirse a través de ellos.

Steinich (1996) caracterizó a una región dentro de la zona estudiada como de alta variabilidad en su carga hidráulica (HVZ, por sus siglas en inglés). Un estudio hidrogeológico en esta zona la llevó a concluir que existen varios sistemas de fracturas independientes que tienen poca o ninguna conexión entre ellos. La misma autora también dirigió diversas líneas de investigación: hidrogeológica, hidrogeoquímica y geofísica, que la condujeron a concluir que el segmento suroeste del Cinturón de Cenotes funciona evidentemente como un conducto subterráneo de alta

permeabilidad que lleva el agua subterránea a descargar hacia la costa occidental de Yucatán. La hipótesis original de Marín (1990) supone, de manera implícita, la existencia de un parteaguas en alguna parte del Cinturón. Steinich (1996) propone, con base en estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos, que dicho parteaguas lo constituye una franja delgada localizada en la porción sur del anillo en las inmediaciones del poblado de Abalá. Hidrogeológicamente esta zona se caracteriza por su reducida permeabilidad evidenciada por el comportamiento del nivel del agua subterránea en algunos pozos y mediante el método de resistividad. Adyacente a este parteaguas, también se identificó una zona donde el drenaje es más rápido que en otras áreas. Esta zona, denominada de alta variabilidad en la carga hidráulica, representa un sistema de fracturas con subsistemas independientes que pueden o no tener una débil conexión entre ellos, debido a la diferente respuesta en el drenado en distintas áreas.

La hidrogeología de la porción oriental del cinturón aún no está bien comprendida, aunque los elevados potenciales en esa zona son atribuidos a una disminución en la permeabilidad, debido a que no existe una considerable recarga pluvial que justifique tales elevaciones (Steinich, 1996).

Marín (1990) propone que los procesos de disolución han estado activos sobre la península de Yucatán al menos desde hace 125000 años. Varios eventos regresivos y transgresivos del mar, asociados a los períodos glaciales e interglaciares, han sido registrados desde entonces. En consecuencia, el nivel del agua subterránea ha variado de manera simultánea a las variaciones eustáticas del mar. Probablemente existen niveles de karstificación mejor desarrollados que otros a diferentes profundidades. En Yucatán se han registrado cenotes (dolinas de colapso) con un rango de profundidades de algunos metros hasta de 125 m (Gaona *et al.*, 1980). Steinich (1996) considera a los cenotes como una migración hacia arriba de los sistemas kársticos bien desarrollados en los niveles profundos. Se han reportado cavernas con al menos dos niveles de karstificación; en la zona insaturada y en la zona saturada. Por encima del nivel freático alcanzan desarrollos de hasta 3 km de longitud, desconociéndose su longitud de desarrollo en la zona saturada.

En Mérida, se han localizado peces y camarones a profundidades de 20 m en dos pozos separados aproximadamente 3 km (Buckley *et al.*, 1994). Esto sugiere que, a estos niveles, las cavidades kársticas están bien comunicadas. También, el efecto de las heterogeneidades kársticas sobre

el flujo subterráneo puede influir en forma local o regional, dependiendo de las dimensiones de los fenómenos kársticos, de las fallas geológicas y sistemas de fracturas. Bauer-Gottwein *et al.* (2011) sugieren la existencia de fracturas de escala regional (10-100 km), grandes conductos de disolución (1-10 km) y fracturas de pequeña escala y cavidades de disolución de decenas de metros. Es por esto que en los estudios futuros de la contaminación del acuífero, al menos en la ciudad de Mérida, durante las campañas de monitoreo de la contaminación del agua subterránea, deberían incluirse estos horizontes. En el caso de los flujos verticales inducidos por recargas en la porción superior al acuífero, o bien, por la disposición de aguas residuales mediante pozos de inyección, este subsistema tiene una función hidrogeológica determinante.

El agua subterránea se mueve en forma radial; de la esquina SE del estado de Yucatán, hacia la costa, con dirección N-NW. La carga hidráulica cero del mar es el principal factor que determina la naturaleza radial del flujo regional. La anisotropía provocada al acuífero por las características kársticas y los sistemas de fracturas, así como la geología, controlan en forma local al flujo subterráneo. En casi toda el área, con excepción de las cercanías de Mérida, el patrón de flujo regional es consistente en el tiempo (**Figura 7**). Las líneas equipotenciales evidencian un parteaguas subterráneo que se localiza al SW de Mérida y parece coincidir con el segmento NW del Cinturón de Cenotes.

El bajo gradiente hidráulico de 0.007 m/km (Marín *et al.*, 1989), en la parte central del estado de Yucatán, sugiere que la conductividad hidráulica es muy grande (Back y Hanshaw, 1970).

Figura 7. Configuración regional de potenciales hidráulicos al N-NW del estado de Yucatán: (a) época de lluvias, (b) época de estiaje.



En el límite oriental y en el tramo de Sotuta a la costa de Dzilam Bravo, la dirección del flujo tiende a ser de manera franca hacia el norte. Tal como lo sugiere Steinich (1996), esta zona parece ser de menor permeabilidad, pues el gradiente hidráulico ha sido estimado en 0.02 m/km, que equivale a un orden de magnitud superior al valor mencionado previamente. Valores promedio de 0.022 m/km del gradiente hidráulico también han sido reportados entre Mérida y Progreso (Rocha *et al.*, 2015). Entre las localidades de Chapab y Kantunil, las líneas equipotenciales indican que un flujo proveniente del SE atraviesa el denominado Cinturón de Cenotes; esta zona podría ser el parteaguas hidrogeológico del Anillo de cenotes, de acuerdo con el funcionamiento hidrogeológico del cinturón propuesto por Marín (1990). Este parteaguas quedaría localizado en la zona de alta variabilidad de niveles del agua (HVZ) propuesto por Steinich (1996) y no en las proximidades de Abalá, donde ha sido ubicado.

Intrusión salina en el acuífero del Cinturón de Cenotes

En acuíferos costeros, el agua subterránea se encuentra sobre el agua de mar creando una zona de mezcla en la que existe un gradiente de concentración de sales debido a fenómenos de difusión y dispersión. En esta zona existe un continuo flujo y reflujo de sales regulado por el equilibrio hidrostático entre el océano y el acuífero; equilibrio que es controlado en forma estacional por el clima. Las sales provenientes del mar penetran por debajo del agua subterránea, introduciéndose al acuífero tierra adentro. La longitud que se extiende tierra adentro depende de la hidrogeología, de los bombeos para abastecimiento y de la relación hidrostática entre ambos sistemas. Durante la estación de lluvias, el acuífero se recarga diluyendo las sales que ingresaron. Tal recarga incrementa la energía del sistema y, con ello, también la descarga del agua subterránea hacia el mar, lo que contribuye a expulsar las sales que ingresaron al acuífero en la época de estiaje. De esta manera, el espesor del agua dulce del acuífero incrementa, reduciendo el espesor de la zona de mezcla y la extensión que el agua de mar ocupó tierra adentro durante el estiaje. Esta zona de mezcla puede estar en equilibrio dinámico por los diversos mecanismos que provocan las variaciones del nivel del mar y las fluctuaciones de la carga hidráulica del acuífero inducidas por los esfuerzos hidrológicos naturales o en desequilibrio; consecuencias de las actividades antropogénicas como los bombeos intensivos en núcleos urbanos y zonas turísticas.

El principio de Ghyben/Herzberg (G/H) establece que la profundidad de la interfase marina, con respecto al nivel medio del mar (z), puede localizarse según la siguiente relación de densidades del agua de mar (ρ_m) y la del agua dulce (ρ_d):

$$z = \frac{\rho_d}{(\rho_m - \rho_d)} h = 40h \quad (1)$$

El principio asume la existencia de un acuífero homogéneo e isótropo sin descarga al mar y también supone que el agua de mar y el agua dulce son fluidos inmiscibles; de tal forma que la interfase marina es una línea que separa en forma brusca el agua de mar del agua dulce.

La interfase marina, que es un concepto teórico, se localiza dentro de la zona de mezcla. La conductividad eléctrica del agua del acuífero yucateco tiene un alto grado de correlación con la concentración de cloruros en la misma, de tal forma que la profundidad de la interfase marina podría obtenerse en forma aproximada para valores de la conductividad eléctrica equivalentes al 50% de este parámetro en el agua de mar (Frind, 1982). La conductividad eléctrica del agua de mar (CE_{mar}) medida en la costa norte de Mérida fue de 44 000 mS/cm. Así, la interfase marina se localiza para valores equivalentes a 22 000 mS/cm.

En tanto que la parte superior o techo de la zona de mezcla se localiza para un valor de la conductividad eléctrica del agua equivalente al 5% de la CE_{mar} y su base se localiza para un contenido de CE igual al 95% de la CE_{mar} (Custodio y Llamas, 1983). Cooper (1959) ubica a la interfase entre el agua dulce y el agua salada en el punto de inflexión de la curva de concentraciones, en tanto que Kohout (1961) la ubica en el gradiente horizontal nulo de las cargas hidráulicas.

En el acuífero de Yucatán, el agua subterránea adecuada para consumo humano y otros usos yace sobre la cuña de intrusión marina. Esta cuña de agua salada se extiende por debajo de toda la porción acuífera del estado de Yucatán. La profundidad de la interfase marina aumenta en forma radial desde la línea de costa hacia la porción más septentrional (**Figura 8**). Debajo de la ciudad de Mérida, se localiza entre 45 y 50 m (Gaona *et al.*, 1985). Steinich (1996) reportó haberla detectado, mediante sondeos eléctrico verticales, a aproximadamente 58 m de profundidad (con respecto al NMM) a 10 km al este del poblado de Maxcanú.

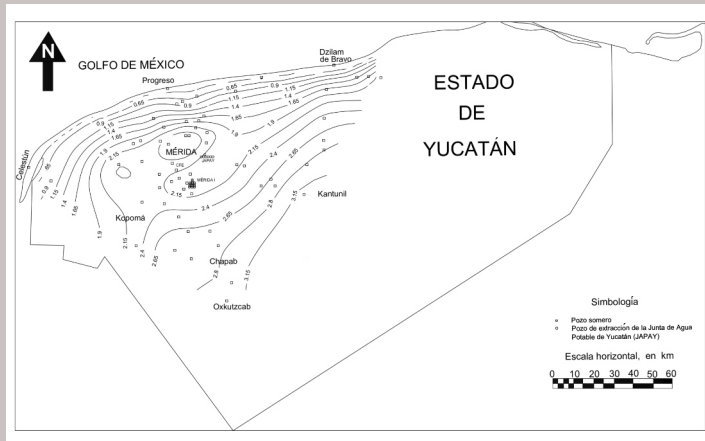


Figura 8. Profundidad de la interfase salina con respecto al nivel del mar.

Acuífero en Mérida

El caliche superficial en gran parte del acuífero del interior del Cinturón de Cenotes se encuentra densamente fracturado. Es a través de estas fracturas que el agua pluvial se infiltra rápidamente y recarga al acuífero en cuestión de minutos. Por debajo del caliche fracturado, se localiza un horizonte karstificado de espesor variable de algunos a decenas de centímetros y puede extenderse en forma continua hasta por varias decenas de metros. En ocasiones, se halla relleno de suelo que es transportado por el agua de infiltración (Figura 9). En lo sucesivo, este subsistema será denominado *Horizonte caliche/karst*, (H-C/K).

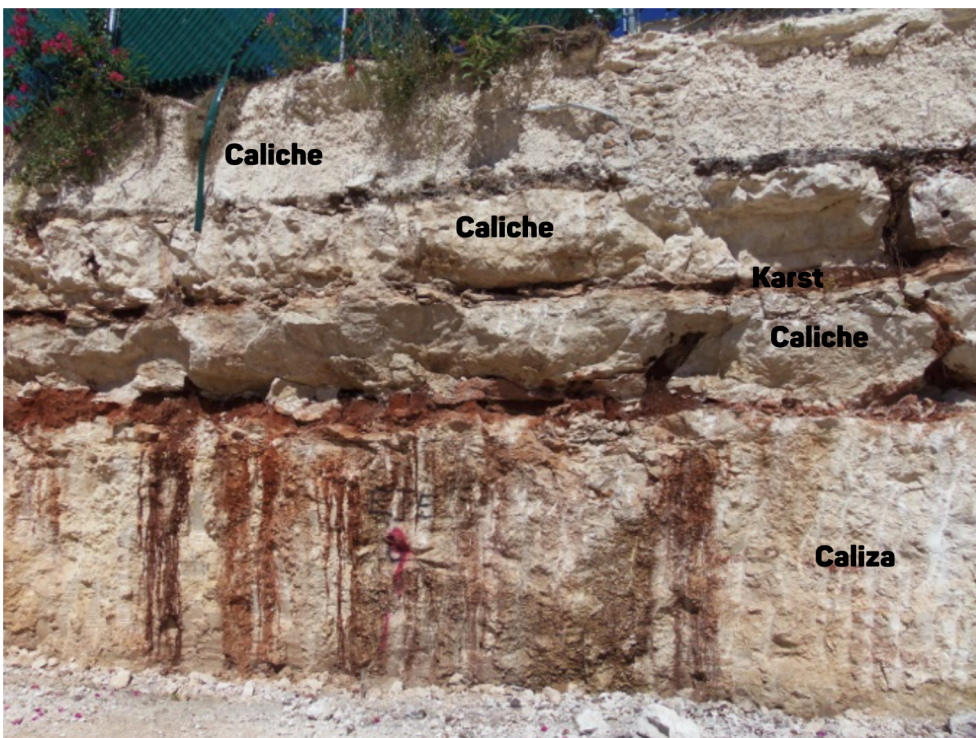


Figura 9. Subsistema caliche/karst.

Al parecer, la hidrogeología de la caliza del Mioceno-Plioceno está principalmente determinada por estos horizontes karstificados (**Figura 10**). Dicho horizonte se extiende de manera discontinua en la caliza del Mioceno-Plioceno. A lo largo de este horizonte se desarrollan importantes flujos horizontales en la zona insaturada que finalmente convergen hacia un pozo o hacia una fractura, por la cual desciende el agua hasta recargar al acuífero. El efecto de estas fuertes recargas puntuales se traduce en elevaciones extraordinarias del nivel del agua (mayores a 4 m) en los pozos someros (Figura 11). También es de notarse la rápida disipación de esta carga hidráulica impuesta súbitamente al sistema, como consecuencia de la elevada conductividad hidráulica.

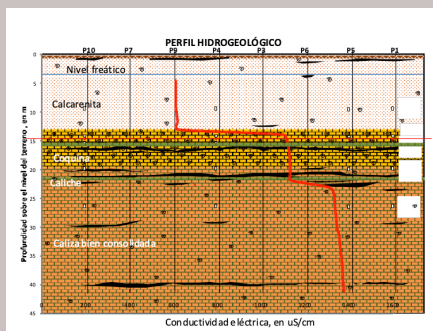


Figura 10. Esquema hidrogeológico del acuífero de la ciudad de Mérida, en los primeros 50 metros de profundidad.

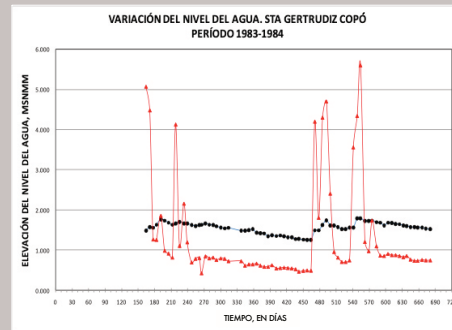


Figura 11. Variación de la elevación del NF medida en 43 pozos someros a intervalo semanal al norte del límite urbano de Mérida, donde la profundidad del NF varía entre 4 y 6 m de profundidad. 38 de los pozos siguieron el patrón de comportamiento representado por la curva con círculos y cinco de los pozos, de acuerdo con el gráfico de los triángulos.

Este subsistema hidrogeológico conformado por una capa de caliche, de baja permeabilidad, sobreyaciendo a un horizonte karstificado, con elevada conductividad hidráulica, al parecer se encuentra presente en el subsuelo a varias profundidades, quizás tantas veces como recesiones del mar hubieron, lo suficientemente prolongadas como para que los procesos que los crearon operaran. La importancia hidrogeológica de este subsistema caliche/karst, en la zona saturada, se refleja en débiles abatimientos, reducidos conos de influencia y estabilización casi inmediata del nivel dinámico durante los bombeos. También, al parecer tiene una importancia decisiva en el transporte advectivo de contaminantes a través del desarrollo de flujos preferenciales del agua subterránea.

Los flujos preferenciales ocurren principalmente en aquellos horizontes del acuífero que están fracturados y/o karstificados. Evidencias de la importancia de estos horizontes (C/K) en el flujo subterráneo durante la explotación del agua subterránea por bombeo fueron observados. Durante una prueba de bombeo de corta duración y extrayendo un caudal de 45 m³/h, justamente debajo del nivel freático, Buckley *et al.* (1994) identificaron, utilizando medidores de flujo y registros de conductividad eléctrica y temperatura, que el agua provenía de cavidades de disolución localizadas a los 11 m de profundidad. Los registros del medidor de flujo (antes y durante la prueba) indican, que el flujo se incrementa durante el bombeo en el horizonte con cavidades de disolución (a los 11 m de profundidad). Al comparar los registros de la conductividad eléctrica (antes y durante el bombeo), se aprecia que el agua a nivel freático (ubicado aproximadamente a 5 m de profundidad) durante el bombeo eleva su conductividad eléctrica a valores equivalentes a los registrados a 12 m de profundidad; un comportamiento similar ocurre con la temperatura. Lo anterior señala, que la capa karstificada a los 11 m de profundidad aporta cantidades significativas de agua durante el bombeo.

Buckley *et al.* (1994), también mediante la realización de registros de la conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea en varios pozos en Mérida, detectaron la existencia de flujos preferenciales a distintos intervalos de profundidad de 11 a 12 m, de 21 a 22 m y de 29 a 32 m. Ocurren pequeños cambios en estos parámetros cuando el agua que entra al pozo proviene de sitios con diferente patrón de flujo e historial químico en su recorrido. Las profundidades a las que detectaron estos flujos preferenciales parecen corresponder a la presencia de subsistemas H-C/K detectados en 11 pozos de 50 m de profundidad, localizados en el Campo Experimental Hidrogeológico de la Facultad de Ingeniería de la UADY, con base en registros de video realizados en ellos.

La importancia hidrogeológica de estos horizontes C/K también se ha manifestado en forma de un confinamiento local del agua que circula por el horizonte kárstico. De cinco multipiezómetros duales construidos en la ciudad de Mérida, a 12 y 30 m de profundidad, en tres de ellos han sido detectados diferencias en las cargas hidráulicas, de 5 y 30 cm entre estas profundidades y registrándose la mayor carga en el piezómetro más superficial.

Brewerton (1993) determinó la permeabilidad primaria en varios núcleos de roca obtenidos a diversas profundidades, en los primeros 50 m del

acuífero de Mérida. El valor de la conductividad hidráulica primaria de la caliza acuífera de Mérida, estimado con base en la permeabilidad intrínseca representativa de cada unidad litológica, es del orden de 0.3 m/d a 1.2 m/d (**Tabla 1**). Estos valores están próximos al valor mínimo del rango de conductividades hidráulicas (0.1 a 4000 m/d) obtenidos para acuíferos kársticos por Freeze y Cherry (1979). Con base en la permeabilidad intrínseca de cada unidad litológica, la transmisividad estimada, en varios pozos donde se disponía de registro litológico completo, varía de 16 a 70 m²/d.

Tabla 1. Unidades litológicas presentes en el subsuelo de Mérida, Yucatán. Conductividades hidráulicas.

Litología	Kh (m/d)	Kv (m/d)
Coquina	0.37 - 33.00* 0.42 ⁺	0.13 - 29.00* 0.16 ⁺
Caliza margosa deleznable	0.88 - 7.12* 4.00 ⁺	0.74 - 4.82* 2.29 ⁺
Caliza fosilífera recristalizada	2.2×10^{-6} - 1.1×10^{-2} * 3.9×10^{-3} ⁺	1.5×10^{-6} - 5.3×10^{-3} * 1.9×10^{-6} ⁺
Caliza fosilífera recristalizada y con cavidades	0.07 - 0.74* 0.21 ⁺	0.01 - 8.15* 0.20 ⁺
Marga calcárea	0.12	9.6×10^{-3}

* Valores extremos. ⁺ Valores medios.

Buckley *et al.* (1994), mediante una prueba de empaques realizada en el acuífero de Mérida, a dos metros por debajo del nivel freático, determinaron que la conductividad hidráulica es del orden de 6.51 m/d. Recientemente, cinco pruebas de bombeo realizadas en el campo de pozos para el abastecimiento de agua potable a la ciudad de Mérida, JAPAY-I, reportan valores de 287 a 1199 m/d y de transmisividad del acuífero de 8855 a 37211 m²/d (Larena, 2013). La diferencia en dos órdenes de magnitud de la conductividad hidráulica entre ambos autores se debe a la técnica empleada y a la heterogeneidad del medio. La técnica de empaques influye sobre un menor volumen de acuífero, en tanto que la de bombeo abarca un mayor volumen en el que pueden estar contenidas cavidades cársticas que confieren mayor heterogeneidad al medio, ya que la conductividad hidráulica del acuífero puede variar en varios órdenes de magnitud de un sitio a otro.

Por otro lado, mediante un análisis de las mareas y considerando que el almacenamiento específico en acuíferos kársticos es del orden de 5×10^{-7} a 1×10^{-3} m (Freeze y Cherry, 1979), Reeve y Perry (1990) estimaron que

la conductividad hidráulica en la costa norte de Yucatán podría variar de 22 a 44928 m/día. Villasuso *et al.* (2011), aplicando el modelo de Ferris (1952) a la variación del nivel del agua subterránea, debido a las mareas, en pozos localizados a distancias entre 1.6 y 8.1 km de la costa, al sur de Progreso y dentro del acuífero confinado, registró valores entre 2294 y 6700 m/d y con un valor característico de 5100 m/d, para el acuífero libre estimaron 21500 m/d.

Este conjunto de datos, resumido en la **Tabla 2**, sugiere que la conductividad hidráulica dominante está determinada por el sistema de fracturas y los conductos de disolución. Es notable que el volumen del acuífero considerado en las pruebas mencionadas, para medir la conductividad hidráulica, varía de acuerdo con la técnica aplicada para la evaluación de la misma. Un volumen grande de acuífero implica mayor influencia de las heterogeneidades kársticas en la determinación de la conductividad hidráulica y, por tanto, mayor representatividad de este valor en el sistema. Considerando que el estudio de la hidrodinámica entre el mar y el agua subterránea involucra un volumen considerable de acuífero, es posible que el rango de valores estimados de la conductividad hidráulica mediante este método sea representativo de este sistema. Lo anterior está fuertemente respaldado por el resultado de los diversos modelos numéricos implementados para simular el flujo subterráneo en Mérida y en el AICC. Las mejores calibraciones en cada uno de ellos se obtuvieron para valores en la conductividad hidráulica dentro del orden de magnitud a los obtenidos mediante el efecto de las mareas sobre el nivel del agua subterránea (**Tabla 2**).

Los flujos preferenciales ocurren principalmente en aquellos horizontes del acuífero que están fracturados y/o karstificados. Buckley *et al.* (1994), mediante la realización de registros de la conductividad eléctrica y temperatura del agua subterránea en varios pozos en Mérida, detectaron la existencia de flujos preferenciales a varios intervalos de profundidad de 11 a 12 m, de 21 a 22 m y de 29 a 32 m. Ocurren pequeños cambios en estos parámetros cuando el agua que entra al pozo proviene de sitios con diferente patrón de flujo e historial químico en su recorrido. Durante una prueba de bombeo de corta duración y extrayendo un caudal de 45 m³/h justamente debajo del nivel freático, Buckley *et al.* (1994) observaron, utilizando medidores de flujo y registros de conductividad eléctrica y temperatura, que el agua provenía de cavidades de disolución localizadas a los 11 m de profundidad. Los registros del medidor de flujo (antes y durante la prueba) indican que el flujo se incrementa durante el bombeo en

el horizonte con cavidades de disolución (a los 11 m de profundidad). Al comparar los registros de la conductividad eléctrica (antes y durante el bombeo), se aprecia que el agua a nivel freático (ubicado aproximadamente a 5 m de profundidad) durante el bombeo eleva su conductividad eléctrica a valores equivalentes a los registrados a 12 m de profundidad; un comportamiento similar ocurre con la temperatura. Lo anterior señala que la capa karstificada a los 11 m de profundidad aporta cantidades significativas de agua durante el bombeo (Buckley *et al.*, 1994).

Tabla 2. Valores de conductividad hidráulica del acuífero de Yucatán, estimados mediante diferentes procedimientos.

K (m/d)	Referencia	Método	Litología	Observaciones
0.10 – 4000.00	Freze y Cherry (1979)	Desconocido	Desconocida	Obtenidos en diversas regiones kársticas
0.10 – 432.00	González (1984)	Pruebas de laboratorio. Núcleos de perforación	Caliza del Mioceno-Plioceno (M-P) Lutita calcárea, caliza folsilífera, coquina y caliza recristalizada.	Hasta 200 m de profundidad, en Mérida, Yucatán
0.031 – 1.21	Brewerton (1993)	Pruebas de laboratorio en núcleos	Caliza M-P Tabla 1 en documento	Profundidad máxima de 50 m en Mérida, Yucatán
127	Buckley <i>et al.</i> (1994)	Pruebas de empaques	Caliza M-P	Acuífero en Mérida, Yucatán
80.00 – 100.00	Andrade (1984)	Prueba de bombeo	Caliza M-P	Acuífero en Mérida, Yucatán (JAPAY- I)
287-1199	Larena (2013)	Prueba de bombeo	Caliza M-P	Acuífero en Mérida, Yucatán (JAPAY- I)
1 523-3 376 m/d	Rocha <i>et al.</i> (2015)	Prueba de bombeo	Caliza M-P	Mérida. FIUADY
26.00 – 4 320.00	Reeve y Perry (1990)	Efecto de mareas sobre el nivel freático	Caliza del Pleistoceno reciente. Caliza fosilífera	Al sur de Chuburná Puerto
5 100.00 y 21 500.00	Villasuso <i>et al.</i> (2011)	Modelo de Ferris (1957). Mareas	Caliza del Pleistoceno-reciente. Acuíferos confinado y libre	Acuífero en la zona costera, Progreso
864.00	Back y Lesser (1981)	Basado en un balance hidrológico de la península de Yucatán	Caliza de la PY	Península de Yucatán (PY)
8 640.00 – 8 6400.00	Marín (1990)	Modelo numérico de Yucatán. Sistema de dos capas	Período: M-P Espesor hasta 150 m	Acuífero en el interior del Cinturón de Cenotes (AICC)
475.00– 96 336.00	González (1992)	Modelo numérico	Caliza del M-P de la F. Carrilo Puerto	Incluye AICC. Límite: Sierrita de Ticul
12 960.00	Morris <i>et al.</i> (1994)	Modelo numérico	Caliza M-P	Acuífero en Mérida, Yucatán
23 000.00	Sánchez (1999)	Modelo numérico	Caliza M-P	Acuífero en el AICC

La porosidad efectiva de la roca caliza, en los primeros 50 m de profundidad en Mérida varía en un rango del 0.4% al 55% (Brewerton, 1993). Las porosidades más bajas corresponden a una caliza bien cementada y parcialmente recristalizada (caliche) y los valores más altos son característicos de una caliza fosilífera. Brewerton (1993) encontró que la porosidad y la permeabilidad no varían de manera bien establecida con la profundidad ni con su distancia a la línea de costa. La porosidad efectiva de 16 muestras de roca, colectadas a nivel freático a partir de la costa y hasta 87 km al sur en el estado de Yucatán, varía del 15% al 55% con un valor medio equivalente al 33%.

Durante el periodo de recarga, la subida del nivel piezométrico sucede de forma rápida al inicio de un evento de precipitación pluvial y durante el mismo dependiendo de la magnitud de la lluvia y de las condiciones imperantes de la humedad del suelo y la zona insaturada que permitan que ocurra la recarga al acuífero (**Figura 12**). La respuesta del nivel freático ante un evento de recarga pluvial es del orden de minutos, al menos mayor a 5 minutos.

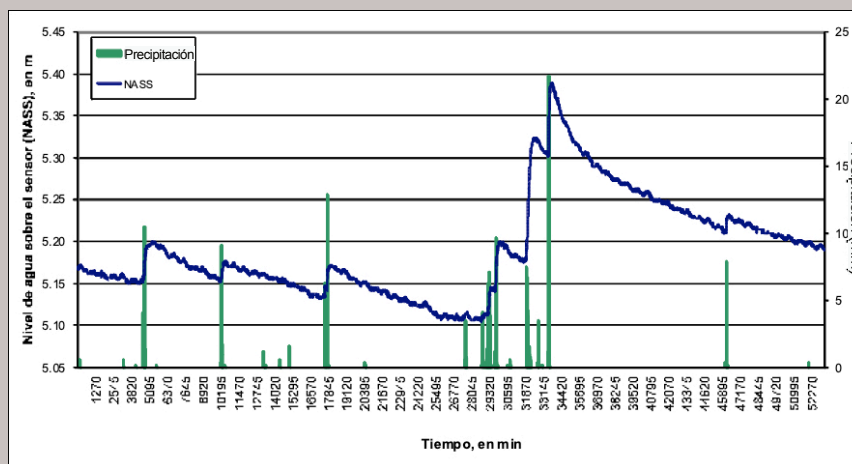


Figura 12. Variación del nivel del agua subterránea por efecto de la recarga pluvial, a intervalos de 5 min.

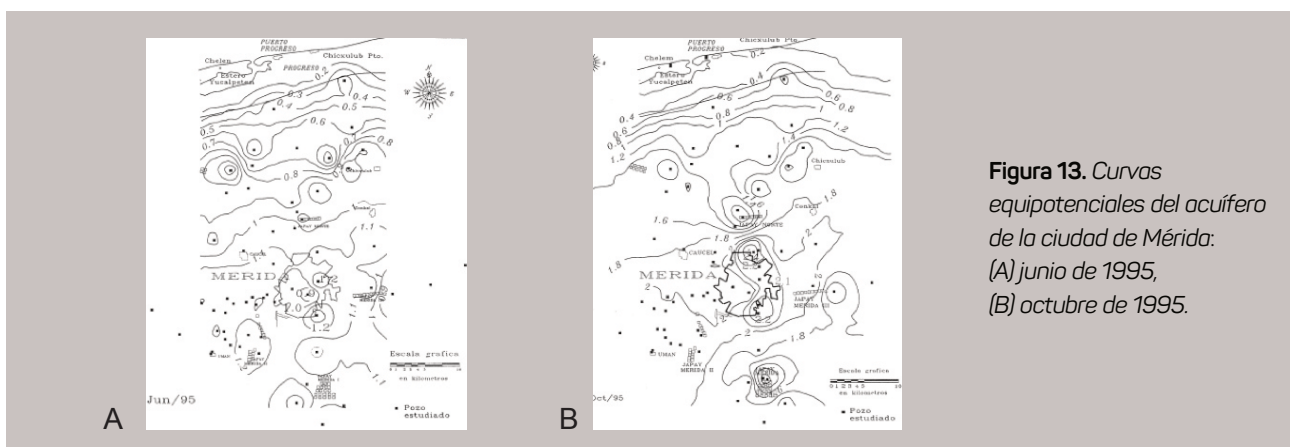
La respuesta del nivel del agua subterránea, medida en un pozo, por efecto de la recarga también depende de la hidrogeología kárstica local del mismo. En algunos pozos cercanos uno de otro, el nivel del agua después de una tormenta puede diferir hasta en 4 m o más. En la zona no saturada se desarrollan, de manera local, flujos preferenciales horizontales a lo largo del horizonte kárstico que subyace al caliche superficial. Cuando este horizonte es interceptado por un pozo, el agua que fluye por los C/K de la zona insaturada es descargada hacia el mismo, elevando bruscamente el nivel del agua. La elevada conductividad hidráulica en la zona saturada del

pozo permite que la carga hidráulica se disipe rápidamente. En la época de menor precipitación, el acuífero presenta una curva de recesión con pendiente media igual a 0.00212 m/d (**Figura 12**). Esta pendiente fue determinada con base en los hidrogramas de 25 pozos localizados en las inmediaciones de la ciudad de Mérida para el período 1983-1985. Las máximas variaciones en el nivel del agua subterránea han sido reportadas durante la presencia de ciclones tropicales en la península. En 1988, cuando el huracán *Gilberto* invadió la península de Yucatán, la cantidad de agua precipitada fue de 14 cm distribuida en casi 72 horas. Como consecuencia de esta recarga extraordinaria, se produjo un incremento en el nivel del agua de 1.5 a 2.0 m registrados un día después del evento; 11 días después del huracán, los niveles de agua en los pozos descendieron rápidamente a 90 cm, en promedio, (Marín *et al.*, 1989).

De manera simultánea al monitoreo descrito anteriormente, también se midió el nivel del agua subterránea en varios pozos someros, pozos profundos y multipiezómetros localizados dentro de la ciudad de Mérida. Sólo en dos de los multipiezómetros, la carga hidráulica resultó igual para cada uno de los piezómetros y para el pozo profundo adyacente. En todos los demás se reportó que la carga hidráulica a los 12 m de profundidad fue superior en un orden de 7 a 30 cm que la medida en el piezómetro a 32 m de profundidad. Se cree que la elevada recarga urbana y/o la excesiva extracción del agua existente a esta profundidad sean las causas de esta diferencia de potencial en el sistema (Buckley *et al.*, 1994). Es decir, que la baja permeabilidad de la capa de caliza recristalizada que se halla entre los 20 y C/K 32 m de profundidad aproximadamente (ver **Figura 10**), es capaz, en algunas zonas, de disminuir la transmisión de la recarga urbana hacia niveles inferiores, manteniendo así tales diferencias de carga. Es claro que la función hidrogeológica de estas capas no es uniforme en el acuífero de Mérida, debido a que en dos de los seis multipiezómetros estudiados no existió diferencia en la carga hidráulica entre los piezómetros instalados a 12 y 30 m de profundidad.

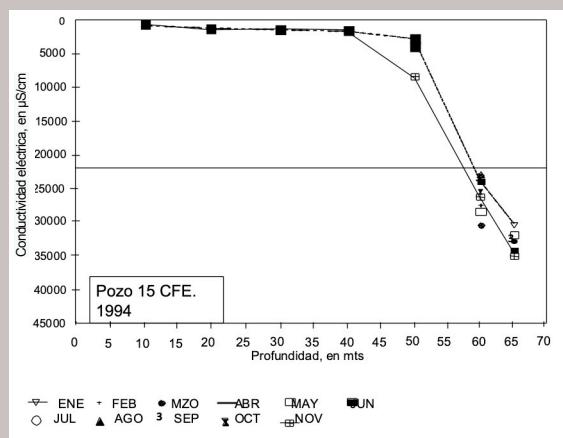
En las inmediaciones de la ciudad de Mérida, la dirección del flujo subterráneo difiere notablemente del patrón regional. Las líneas equipotenciales para la época de lluvias revelan que el nivel freático debajo de la ciudad de Mérida se eleva, formando un domo de agua (**Figura 13**). Este parece modificar el patrón de flujo subterráneo a nivel freático causando una reversión en el gradiente hidráulico local. Este efecto se manifiesta con una tendencia a disiparse a finales del período de menor precipitación. Las configuraciones de las cargas hidráulicas durante la época de lluvias,

del acuífero en Mérida, confirman las observaciones del comportamiento del domo de recarga urbana arriba mencionado. En la **Figura 13**, se observa que en el mes de junio, cuando se inicia el período de recarga pluvial, el domo prácticamente no existe; sin embargo, al final del período de recarga, es decir, en octubre, se manifiesta el domo de recarga. Es importante observar que la presencia del domo corresponde a eventos extraordinarios de precipitación pluvial tales como los generados por los huracanes *Gilberto*, en septiembre de 1988; así como *Ópalo* y *Rossana*, en septiembre de 1995. Gran parte de la elevada precipitación pluvial generada por dichas tormentas se infiltra directamente al acuífero debajo de la zona urbana de la ciudad, a través de pozos de absorción, construidos aproximadamente entre 2 y 4 m por encima del nivel freático, en virtud de que no existe un sistema de drenaje pluvial. Para años en los que ocurre una precipitación anual próxima a la media anual de 1250 mm en el estado, el domo de recarga no llega a ser tan evidente. Lo anterior revela el carácter transitorio de la formación del domo de recarga en la ciudad de Mérida, cuya formación acentuada está directamente relacionada con la precipitación pluvial, además de la recarga urbana y la explotación del acuífero tal como propusieron Morris *et al.* (1994). Ellos estimaron que la recarga urbana en la ciudad de Mérida es de 600 mm/a, en contraste con la infiltración natural de la lluvia al acuífero fuera de la ciudad, equivalente a 100 mm anuales. Morris *et al.* (1994) creen que la elevada recarga urbana sea la causa de la formación del domo a nivel freático debajo de Mérida. Por otro lado, los pozos de abastecimiento de agua potable lo constituyen cuatro campos de pozos ubicados en la periferia de la ciudad que, conjuntamente con 12 pozos localizados en el área urbana, extraen anualmente de $88.5 \times 10^6 \text{ m}^3$. Es posible que tales extracciones tiendan a acentuar el efecto del domo debajo de la ciudad; sin embargo, la elevada permeabilidad de la caliza permite flujos rápidos fuera de la ciudad, reduciendo el impacto de la formación de un domo pronunciado.



Los resultados de un monitoreo mensual de la variación de la conductividad eléctrica con la profundidad y de la carga hidráulica, en un pozo al sur de la ciudad de Mérida, indican que la interfase marina se encuentra a 49 m debajo del nivel medio del mar (**Figura 14**). También se observó que ante una variación de la carga hidráulica de 1.35, en la época de menor precipitación pluvial a 1.62 m en el período de mayor recarga, su posición fluctuó de 48.56 m (con respecto al nivel medio del mar) en la época de descarga, a 49.66 m en el período de recarga. En contraste con la relación de Ghyben/Herzberg, la posición de la interfase en función a las cargas hidráulicas debería ser de 51.3 m y 61.56 m, respectivamente.

Figura 14. Monitoreo mensual de la interfase salina en un pozo profundo localizado al sur de Mérida.



Se cree que el flujo subterráneo del acuífero casi horizontal en la interfase marina es lo que promueve una mayor dispersión longitudinal de sales, en comparación con la dispersión transversal debida a las fluctuaciones de la interfase. Se estimó que la pendiente de la interfase en esta zona es del orden de 1/2500 m/m. En analogía al supuesto de Dupuit (1863), que supone que para pendientes del nivel estático del orden de 1/1000 a 1/10000, el flujo puede considerarse horizontal; el flujo subterráneo sobre la interfase con tal pendiente también podría considerarse horizontal. Cálculos sobre la profundidad de la interfase empleando esta pendiente son consistentes a los estimados por Steinich (1996), mediante Ghyben/Herzberg y sondeos eléctricos verticales a 20 km al sur de Mérida.

En los límites sur y norte de Mérida, el espesor de la zona de mezcla de agua dulce/agua salada es del orden de 33 m (Villasuso *et al.*, 1984). Estudios recientes reportan espesores para las temporadas de lluvia

(33 m) y estiaje (31.5 m), y un espesor promedio de 26 m al norte de Mérida, a 15 km de la línea de costa donde no hay una variación entre ambos períodos (Rocha *et al.*, 2015).

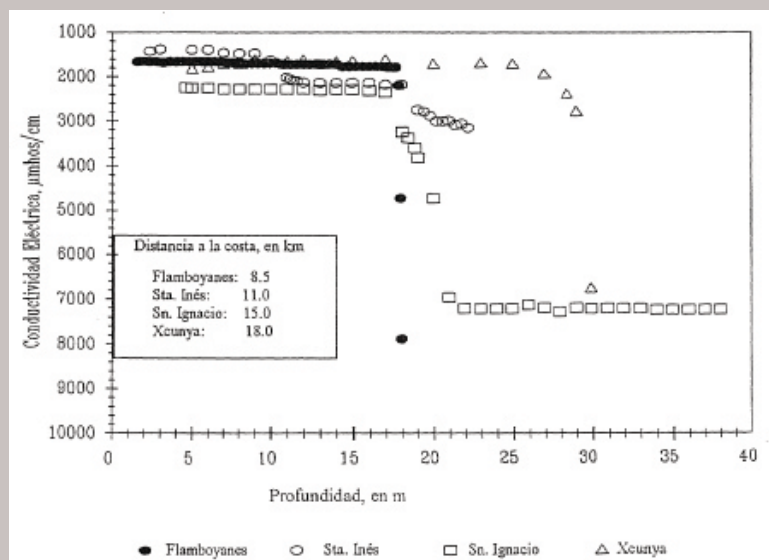
Escolero *et al.* (2004) reporta un estudio realizado en un pozo localizado al sur de Mérida, donde el máximo valor medido de la conductividad eléctrica del agua fue de 80 000 S/cm, de manera que el principio G/H a veces se cumple y a veces no. Lo relevante de esta información es que la CE del agua subterránea es equivalente al doble del valor de CE del agua de mar, aproximadamente 44 000 S/cm (Laboratorio de Ingeniería Ambiental de la FIUADY).

Mediante el análisis de las concentraciones de los elementos mayores y elementos traza tales como Fe_{total} , B, F^- , Sr^{+2} , Ba^{+2} , I^- y Br^- en el agua subterránea, se concluyó que el extremo salino del agua subterránea del acuífero en Mérida corresponde a agua marina diferente del agua marina actual. Por lo tanto, la mezcla no es consecuencia de un proceso de intrusión salina, como generalmente se ha supuesto en la península, sino que el agua salada que se encuentra en el subsuelo está enriquecida en sales que proceden de facies evaporíticas que se depositaron durante los períodos de emersión en la península (Graniel *et al.*, 1999). Este estudio puede explicar por qué el valor de la CE del agua (80 000 S/cm; Escolero *et al.*, 2004) es mayor al del agua de mar en la costa. En este sentido también puede explicar que el comportamiento de la variación de la interfase marina, en la ciudad de Mérida, no sea concordante con las variaciones locales de la carga hidráulica, sino que obedezca quizás al efecto de flujos más regionales.

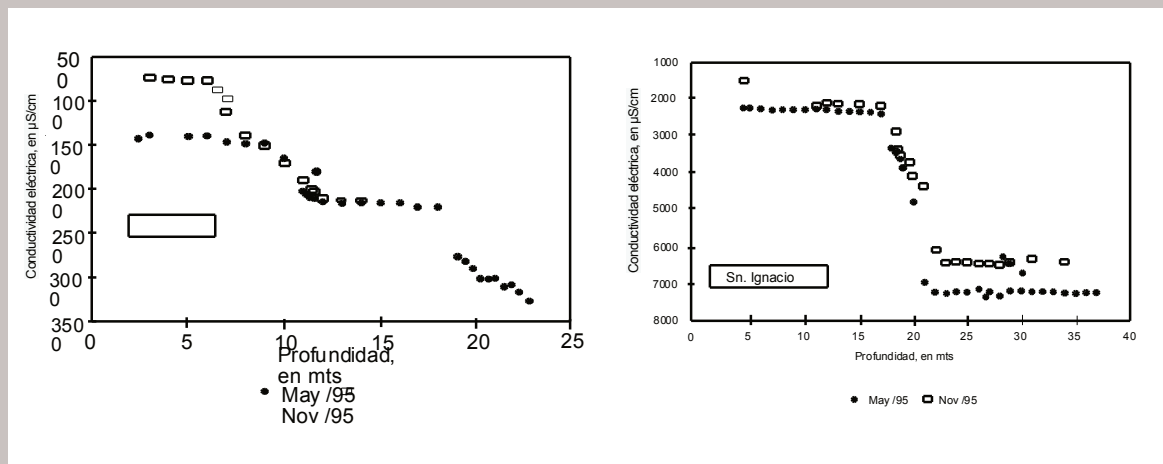
Otro aspecto relevante del estudio de Rocha *et al.* (2015) es en cuanto a la hidrodinámica de la interfase por efecto de la recarga pluvial. De los 13 pozos en los que se estudió esta dinámica, en siete de los estudiados el comportamiento de la interfase fue la esperada. Por ejemplo, en cinco de los pozos que se localizaron en la zona urbana de Mérida, de éstos, todos observaron que la fluctuación del techo de la zona de mezcla profundiza durante los períodos de recarga y se eleva durante los períodos de descarga del acuífero, como es de esperarse. No obstante, los seis pozos restantes, distribuidos entre la capital del estado y Progreso, el comportamiento en algunos casos fue contradictorio. Los autores atribuyen este comportamiento anómalo a las características kársticas del acuífero, por los que se desarrollan flujos preferenciales.

Registros de conductividad eléctrica y temperatura se realizaron a cuatro pozos ubicados en diferentes distancias al sur de la línea de costa de Puerto Progreso y hasta los 18 km (Figura 15). La conductividad eléctrica en los primeros 17 m de profundidad varía débilmente en todos los pozos. Este mismo comportamiento de la conductividad eléctrica se registró en tres barrenos exploratorios, de 20 m de profundidad y sin ademe, ubicados entre Flamboyanes y San Ignacio a 5 y 10 km al oriente de ellos (Anónimo, 1989). Por debajo de esa profundidad, este parámetro se incrementa de manera notable en los pozos Flamboyanes, Santa Inés y San Ignacio, probablemente como consecuencia de flujos preferenciales de agua marina hacia tierra adentro. Se ha mencionado que a estos niveles, debajo de la ciudad de Mérida, se presentan horizontes con cavidades de disolución en los que se detectaron flujos preferenciales del agua subterránea (Buckley *et al.*, 1994). Por otro lado, el pozo San Ignacio, ubicado a 15 km al sur de la costa, tiene valores de conductividad eléctrica más altos que los registrados en los primeros metros de profundidad, en el pozo Flamboyanes y Santa Inés, localizados a 8 y 11 km de la costa. Cooper (1959) demostró analíticamente que la dispersión de sales como consecuencia de la intrusión marina es mayor en estratos de elevada conductividad hidráulica. Esto sugiere que la intrusión marina penetra al acuífero mucho más que en otros lugares, en forma de dedos, probablemente debido a la heterogeneidad del sistema kárstico (Freeze y Cherry, 1979).

Figura 15. Registros de conductividad eléctrica del agua subterránea, realizados en pozos profundos localizados a diferentes distancias de la costa hacia la ciudad de Mérida.



En algunos pozos se han reportado efectos de dilución de sales, por la infiltración del agua pluvial, tanto en la zona más inmediata a la columna de agua freática como en la vertical a 3 m de profundidad (**Figura 16**); únicamente en el pozo de San Ignacio se observó una significativa disminución de las sales por el efecto de la recarga. Aunque ninguno de estos pozos alcanzó la interfase marina, es probable que esta disminución en sales sea consecuencia de la dinámica de la interfase, que profundiza por efecto de la recarga, incrementándose el lavado de sales por el flujo del agua subterránea que descarga hacia el mar.



(A)

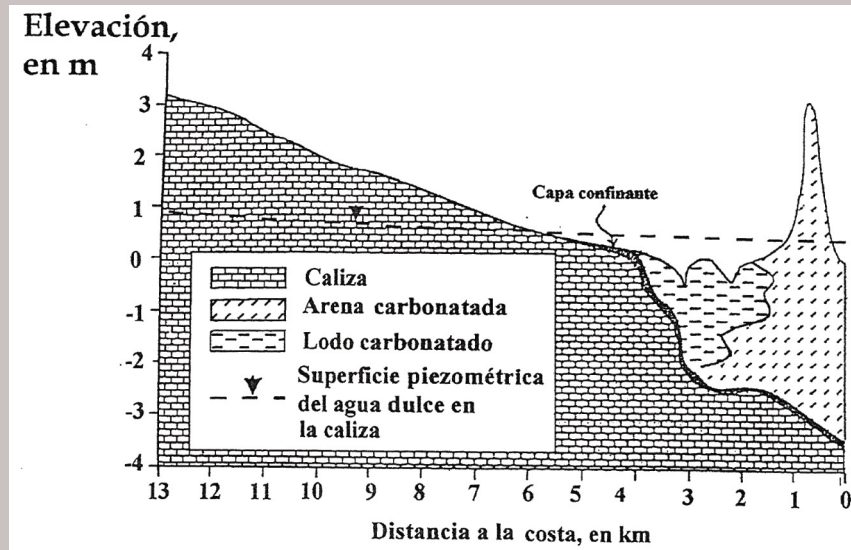
(B)

Figura 16. Monitoreo de la conductividad eléctrica del agua subterránea, en pozos profundos, en época de estiaje y lluvias: (A) Santa Inés y (B) San Ignacio.

Acuífero en la franja costera

A esta sección del acuífero se le considera un sistema libre, a excepción de una franja virtualmente continua a todo lo largo de la costa del estado de Yucatán, de ancho variable (entre 2 y 20 km); en las inmediaciones al puerto de Chuburná, al norte de Mérida, se extiende 5 km tierra adentro y se prolonga hacia el mar 5 km, aproximadamente (**Figura 17**) (Perry *et al.*, 1989).

Figura 17. Capa calcárea, delgada y somera, presente en el litoral norte de Yucatán (modificado de Reeve, 1990).



Esta franja está formada por una delgada capa, de 0.5 a 1.4 m de espesor, de baja permeabilidad, que confina al acuífero en la zona de descarga hacia el mar. Procesos de sedimentación y precipitación de calcita rellenan los poros de la caliza, dando lugar a la formación de esta capa. El confinamiento produce elevaciones de la superficie piezométrica de casi 0.5 m por encima del nivel del mar, provocando que la interfase marina profundice a casi 18 m por debajo del nivel del mar (Perry *et al.*, 1989).

En casi todo el litoral costero se ha manifestado el efecto de las mareas sobre el nivel del agua subterránea. Variaciones entre 2 y 33 cm fueron registradas a 13 y 5.5 km de la costa, tierra adentro, respectivamente, asociadas a la fluctuación de las mareas al sur del puerto de Chuburná (Reeve, 1990). Al sur de Progreso, el efecto de la marea se propagó hasta 8.1 km con una amplitud máxima de 4.5 cm y una eficiencia en la transmisión del 4%; en tanto que en Celestún y Dzilam de Bravo, el efecto se detectó a 14 y 11.8 km de la costa, con eficiencias del 72 y 29%, respectivamente (Cámara, 2007). De la base de datos de la variación del nivel piezométrico de la red de monitoreo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se han identificado variaciones del nivel del agua entre 1 y 5 cm a 5 km de la costa en Telchac Puerto y Dzilam de Bravo, en tanto que pozos ubicados a 10 km de la costa en San Felipe y El Cuyo se observaron variaciones del nivel del agua de 1 a 7 cm.

La extensión de la propagación del efecto de las mareas sobre el acuífero tierra adentro es un indicativo del efecto confinante que ejerce el caliche en la zona de descarga, ya que en acuíferos libres este efecto se disipa a cortas distancias de la costa, debido a que la producción específica de los acuíferos libres es mayor que el almacenamiento en los acuíferos confinados y a que el

nivel freático permanece en contacto con la atmósfera, lo que también contribuye a atenuar la transmisión de la marea (Erskine, 1991; Li *et al.*, 2001).

Cámara (2007) observó que el gradiente hidráulico varía por efecto de la marea (**Figura 18**) y que dicha variación tiene un efecto regulatorio sobre el flujo que descarga al mar, haciéndolo disminuir e incrementándolo periódicamente según las mareas, además sugiere que para el estudio del flujo subterráneo en acuíferos costeros influidos por las mareas, es necesario el filtrado de este efecto en las series de tiempo de la carga hidráulica para la obtención de un valor medio, y así poder analizar el movimiento del agua subterránea mediante las técnicas de redes de flujo. Como valores medio del gradiente hidráulico en la costa, se estima que éste sea de 10.61 cm/km en la zona de Progreso y en Dzilam de Bravo de 11.94 cm/km (Cámara, 2007).

El agua subterránea del acuífero del interior del Cinturón de Cenotes descarga hacia las costas del estado de Yucatán. Rocha *et al.* (2015) observaron que el patrón de flujo desde Mérida hacia Progreso experimenta variaciones direccionales en forma estacional. Variaciones que han sido manifiestas al final de las épocas de estiaje y de lluvia.

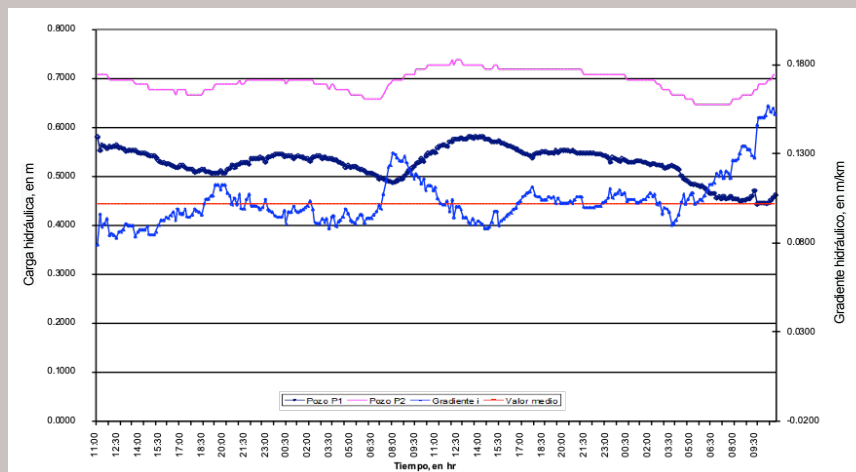


Figura 18. Registro de la fluctuación del nivel del agua subterránea y variación temporal del gradiente hidráulico (Cámara, 2007) por efecto de las mareas del acuífero al sur de Progreso. P1 a 2.5 km y P2 a 4.1 km de la costa.

En las inmediaciones de la costa, en una franja de aproximadamente 8 km de ancho, al sur de Progreso, existe una amplia zona de dispersión provocada por la descarga del agua subterránea y por las fluctuaciones de la zona de mezcla inducidas por las mareas.

La aplicación del principio de G/H para estimar la profundidad de la interfase marina no ha sido consistente, de tal manera que existen controversias en su aplicación. Perry *et al.* (1989) proporcionan buenas estimaciones de la profundidad de la interfase marina a mayores distancias de la costa; estimaciones que concuerdan con la de varios autores (Gmitro, 1986; Steinich, 1996; Marín, Perry, Essaid y Steinich, 2004; Gondwe *et al.*, 2010), otros encuentran variaciones significativas (Moore, Stoessell y Easley, 1992; Escolero *et al.*, 2007).

Reeve (1990) reporta para el acuífero de Yucatán que la relación de Ghyben/Herzberg no se cumple en una franja de 5 km de la línea de costa hacia tierra adentro, debido a que las características hidrogeológicas de esta franja no satisfacen los supuestos de este principio. Rocha *et al.* (2015) concluyen también que en un pozo localizado a 14.36 km de la costa, hacia el sur de Progreso, la relación de G/H no se cumple.

El espesor de esta zona de dispersión en la costa es mayor de 10 m, según lo indican varios registros de conductividad eléctrica del agua subterránea, realizados en barrenos exploratorios ubicados en la duna de arena de playa (**Figura 19**).

La conductividad eléctrica varió del nivel freático hasta los 9.4 m de profundidad con respecto al nivel del terreno en un rango de 2300 mS/cm a 7100 mS/cm respectivamente (**Figura 19**). Por debajo de esa profundidad, la conductividad eléctrica se eleva bruscamente a valores superiores a los 10 000 mS/cm. Steinich (1996) reporta que la profundidad de la interfase marina medida en la línea de costa es de aproximadamente 18 m. Los registros de conductividad eléctrica y temperatura en el barreno exploratorio Xtampu II señalan una elevación brusca de estos parámetros entre los 3 y 4.5 m de profundidad, lo cual sugiere que el mar intrusión al acuífero como flujo preferencial, ocurriendo por horizontes karstificados o fracturados. Este mismo efecto es de notarse en Xtampu I; sin embargo, en los demás registros, el incremento de la conductividad es gradual, indicando con ello que el mar intrusión al acuífero en forma difusa a través de los intersticios granulares. Cooper (1959) establece que los procesos de dispersión son más fuertes en calizas karstificadas y basaltos fracturados que en medios porosos. Perry (1987) estimó mediante Ghyben/Herzberg que la interfase podría localizarse a una profundidad aproximada de 18 m.

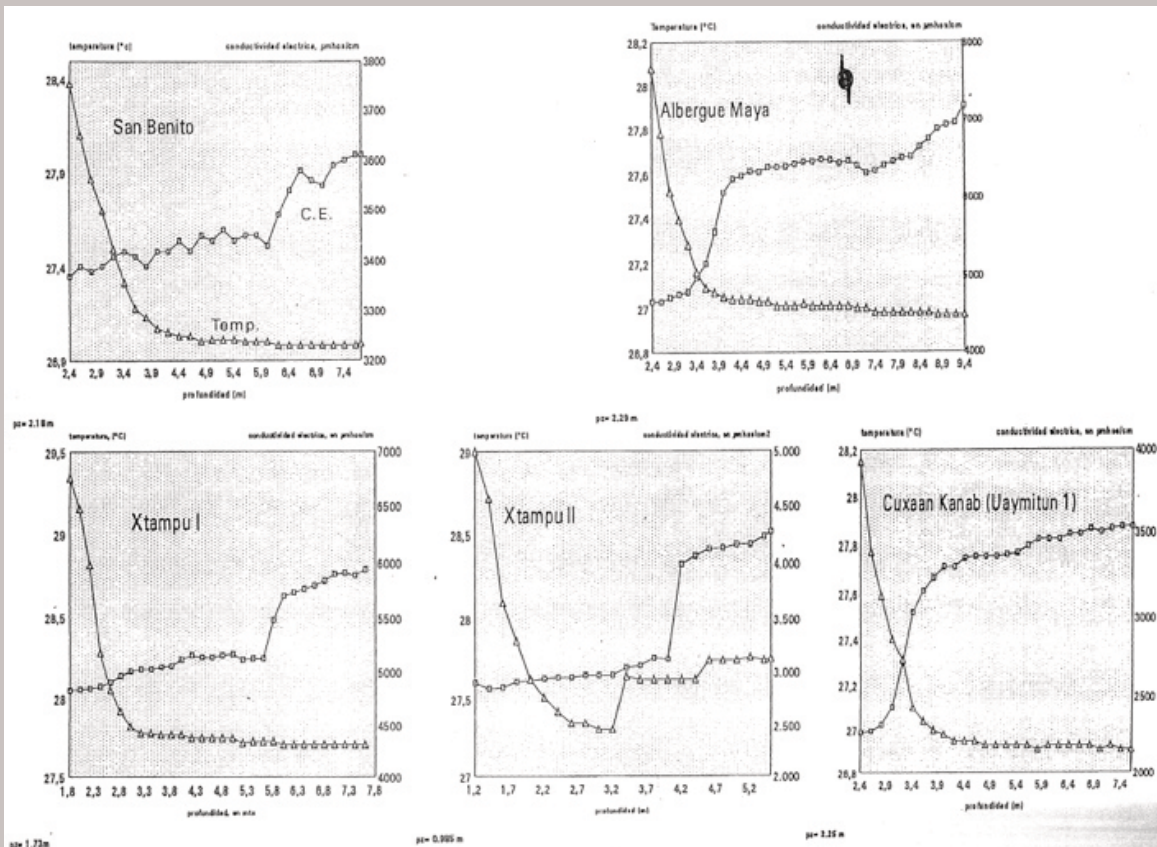


Figura 19. Registros de conductividad eléctrica y temperatura en cinco barrenos exploratorios localizados en la costa, al NE de Mérida.

El estudio más reciente acerca de la dinámica de la interfase marina realizado a partir de la costa norte y hasta la ciudad de Mérida, data de 2015. Los autores concluyen que el comportamiento de la interfase salina ante la recarga es irregular, es decir, ante eventos de la precipitación, la interfase de agua salobre puede elevarse, disminuir o permanecer estática; en otras palabras, no tiene un comportamiento consistente ante la recarga pluvial. También concluyen que la relación Ghyben/Herzberg no se cumple y que el ancho de la zona de mezcla no varía en las cercanías a la costa, pero en la ciudad de Mérida sí varía entre las épocas de lluvia y estiaje. El comportamiento de la interfase salina, ante los períodos de lluvia y estiaje, ha sido asociado a la karsticidad y a los flujos preferenciales que se desarrollan en él (Rocha *et al.*, 2015).

Escolero *et al.* (2004) midieron el comportamiento dinámico de la interfase salina debido a recargas extraordinarias en la ciudad de Mérida. El ascenso y descenso de la interfase durante estos eventos lo explican proponiendo que la recarga es de tipo pistón, lo cual hace que estos grandes volúmenes de agua que recargan al acuífero presionen a la interfase salina, haciéndola descender, para posteriormente ascender cuando la energía de la recarga se ha disipado.

En contraste con los resultados del estudio de la interfase salina al norte de Mérida, Rocha *et al.* (2015), en la costa nororiental del estado de Yucatán, encontraron que la dinámica de la interfase salina es temporal, de acuerdo con la época de recarga y de descarga, y que la profundidad a la que se localiza es mayor conforme la distancia hacia la costa.

La caracterización de la descarga de un manantial submarino localizado en la costa nororiental del estado de Yucatán, a 200 m de la línea de costa, fue realizada en la época de estiaje mediante la medición de la velocidad del agua subterránea y la presión de la columna de agua que descarga al mar a través de un conducto kárstico de disolución. Los resultados muestran que, en las inmediaciones de la descarga del manantial hacia el medio marino, al mismo tiempo que existe una descarga del agua subterránea hacia el mar también existe un flujo del mar en dirección al manantial. Se concluye que la descarga de agua de origen meteórico a través del manantial hacia el mar depende del contraste de densidad entre las aguas ambientales y de descarga, la velocidad ascendente del agua del manantial (dependiente de la flotación y del gradiente hidrostático entre las aguas subterráneas continentales y el punto de descarga al mar) y la altura de la columna de agua, donde todo depende de las mareas (Valle-Levinson *et al.*, 2011). En esta misma zona costera del acuífero de Yucatán empleando técnicas estándar de análisis de señales, se concluye que las oscilaciones de baja frecuencia del mar fuerzan al nivel del agua subterránea y a la intrusión salina; ambos fenómenos fueron observados en dos pozos profundos localizados a 5 y 10 km de la línea de costa (Vera, Mariño-Tapia y Enríquez, 2012).

Transporte de solutos en el sistema kárstico yucateco

El flujo del agua subterránea influye en el transporte de contaminantes que puede ser diferente de la escala regional a la local. Aunque el flujo del agua subterránea en acuíferos kársticos es susceptible de considerarse dentro de un rango comprendido entre flujo por conductos y flujo difuso, mayormente existe una mezcla de ellos con un tipo de flujo predominando sobre otro (Quinlam y Ewers, 1985). El flujo por conductos ocurre en pasajes con velocidades relativamente altas que dan como resultado condiciones de flujo turbulento que convergen gradiente abajo y pueden tener un gradiente hidráulico insignificante (Field, 1989).

El comportamiento inusual de los contaminantes en el acuífero kárstico de Yucatán comienza cuando éstos se introducen, ya sea directa o indirectamente. La contaminación directa ocurre cuando los contaminantes fluyen sobre el terreno hasta llegar a un cenote, un pozo somero o cualquier otra abertura superficial o cuando se inyecta desechos a éstos y a pozos profundos; la contaminación indirecta se refiere a la que se infiltra, ya sea por la zona de suelo o por la zona no saturada o ambas, si la primera existe, antes de llegar al nivel freático. Se espera que exista una acumulación de contaminantes en la matriz de las zonas no saturada y saturada, pero el transporte de contaminantes es principalmente a través de fisuras y grandes conductos presentes en el sistema. Por la naturaleza del acuífero, se supone que la atenuación de contaminantes es muy limitada. Los solutos que llegan a este acuífero pueden transportarse advectivamente y ser difíciles de detectar por medio de pozos de monitoreo.

Zona no saturada

El flujo en la zona no saturada ocurre a lo largo de juntas verticales principales, fisuras, planos de estratificación y de los horizontes kársticos. Se presenta flujo divergente en la zona no saturada debido al gran número de pasajes de desviación. El agua y los contaminantes se mueven siempre progresivamente hacia abajo y hacia rutas tributarias que pueden alimentar a los conductos que se extienden largas distancias. Los contaminantes estarán sujetos a las características de transporte y almacenamiento de esta zona, las cuales son responsables del movimiento rápido y la pobre atenuación de los contaminantes como consecuencia de las propiedades únicas del sistema de flujo; algunas de ellas son desarrollo de cenotes, ampliaciones por solución de fracturas verticales en la zona no saturada y los desarrollos de los conductos en el subsuelo (cavidades y cuevas). Es probable que los contaminantes fluyan tanto vertical como lateralmente a través de esta zona. Puede esperarse un almacenamiento sustancial en esta zona, como en otros acuíferos (Even *et al.*, 1986), permitiendo así, por muchos años, la liberación lenta de constituyentes químicos al acuífero subyacente.

Por lo general, los conductos tienen, en el lecho inferior, una capa de sedimento insoluble sobre el cual pueden viajar los contaminantes; si hay arcillas en estos sedimentos, es probable que éstas absorban los contaminantes.

Existen zonas en cuevas que tienden a almacenar y concentrar a los contaminantes como aquellas donde el nivel del agua solía estar más elevado que el actual. Los montículos de material, resultado del colapso del techo de una cueva, pueden concentrar y almacenar temporalmente los contaminantes. Las tormentas pueden hacer que los contaminantes se muevan a través o alrededor de este material.

La liberación de contaminantes de esta zona ocurre principalmente durante largas tormentas que tienden a remover rápidamente los elementos químicos y formar temporalmente un domo en el nivel freático; este domo ocurre en el momento que el volumen de agua que entra a esta zona empieza a exceder la capacidad de drenaje de la misma, lo cual hace que se desarrolle un gradiente hidráulico que permite el flujo y transporte de contaminantes lateralmente a distancias que pueden llegar a varios cientos de metros.

Zona saturada

El flujo de solutos a cenotes, cuevas o a través de la matriz porosa hacia aberturas discretas puede dar como resultado el transporte extremadamente rápido de contaminantes al acuífero. Este flujo puede ser tan acelerado que la tremenda cantidad de agua que entra al sistema podría causar elevaciones bruscas y exageradas del nivel freático. Así, pueden ocurrir dos problemas: (1) el flujo que entra puede actuar como una barrera hidráulica, causando que el agua y los contaminantes retrocedan contra un mayor potencial creado por la entrada del flujo de agua, y (2) el agua que entra puede estar bajo suficiente presión para conducir el agua freática y los contaminantes gradiente arriba del cenote.

Al alcanzar el nivel freático, el flujo y transporte de contaminantes serán respuesta del gradiente hidráulico en la dirección del conducto freático más cercano. El flujo intergranular y el flujo a través de microfracturas en la zona freática pueden incluir un componente de flujo difuso que conduce al conducto freático; este flujo casi siempre será laminar y obedecerá a la Ley de Darcy, aunque la gran anisotropía invalide el supuesto de que las líneas de flujo sean normales a las líneas equipotenciales (Palmer, 1986).

Puede esperarse flujo vertical hacia arriba a lo largo de pasajes. En una red de flujo los conductos de flujo son las verdaderas líneas de flujo del acuífero. Un conducto freático, a diferencia de una línea freática, será muy tosco, contendrá más giros y esquinas bruscas, y puede estar sujeto a numerosos bloqueos, ya sea temporal o permanentemente.

Durante eventos de flujo lento, es probable que un contaminante se transporte a lo largo de conductos subterráneos; sin embargo, durante grandes tormentas, un incremento en el potencial hidráulico puede ser tan grande que la superficie piezométrica se elevará por encima del nivel del terreno. Los contaminantes: (i) serán forzados a moverse hacia la matriz rocosa circundante, (ii) serán forzados a retroceder por los conductos subterráneos, (iii) descargarán a cualquier pozo o canal conectado directamente a conductos subterráneos.

Un ejemplo de este proceso sucedió cuando el huracán *Gilberto* pasó sobre la costa norte de la península de Yucatán, arrojando 13.8 cm de precipitación según el registro de la estación meteorológica de Mérida. Marín *et al.* (1989) reportaron mareas altas que lavaron la costa, inundando bancos de hasta 1.9 m sobre el nivel medio del mar. La respuesta del acuífero yucateco fue diferente en cada zona. Los residentes de áreas localizadas a pocos kilómetros de la costa reportaron que el agua de sus pozos se elevó aproximadamente 3 m inmediatamente después del huracán, siendo esto considerablemente mayor que la elevación del nivel freático tierra adentro, lo que sugiere que las mareas altas fueron, en parte, responsables del incremento en los niveles de agua en una franja de aproximadamente 25 km de espesor desde la costa. Tierra adentro, los residentes reportaron consistentemente que los incrementos en los niveles de agua en sus pozos, inmediatamente después del huracán, fueron de 1.5 a 2 m, comparado con las elevaciones del nivel freático dos meses antes del evento; los niveles de agua descendieron en el orden de varios centímetros por día.

Algunos pozos responden de manera diferente a tales eventos locales según evidencias obtenidas de dos de ellos en estaciones muy cercanas, localizadas al norte de la ciudad de Mérida, inmediatamente después de la tormenta; sin embargo, es obvio que el acuífero responde muy rápidamente, como un todo, cuando es estresado. Debido a la época de lluvias, el terreno ya se encontraba saturado cuando se presentó el huracán, de manera que su impacto sobre el acuífero fue más notorio.

Pueden ocurrir cantidades significantes de almacenamiento dentro de las microfracturas en la zona saturada; se tiene evidencia de esto en las altas concentraciones de contaminantes en la matriz rocosa cuando ésta es lavada por el flujo de agua subterránea. Como ejemplo se tiene el estudio reportado por Pacheco y Cabrera (1990) y Cabrera (1986); se tomaron muestras mensuales de aguas subterráneas someras en cuatro poblados localizados al norte de Yucatán, las cuales fueron analizadas para determinar iones principales presentes en dichas aguas. Según la interpretación de los resultados, las concentraciones se incrementan durante la época de lluvias, pero disminuyen nuevamente durante la estación de secas. Por otro lado, al parecer, las lluvias no lavan todos los residuos contaminantes; de hecho, éstas tienden a crear una clase de banco de almacenamiento, al cual se conduce el agua y los contaminantes, que no es otra cosa que una cueva localizada arriba del nivel freático y también la misma matriz rocosa. Una vez aquí, el drenaje y las reacciones químicas pueden ocurrir lentamente; así, los contaminantes químicos que llegan a los conductos freáticos no necesariamente se eliminan libremente, sino que pueden ser retenidos por periodos largos.

Se supone que los contaminantes se eliminarán fácilmente si el agua se renueva frecuentemente; mientras mayor sea la descarga del agua subterránea, mayor será el transporte y la dilución. Esto puede dar lugar a la mezcla de diferentes estratos de agua y mejorar la dilución, especialmente para sustancias solubles. Puede ser que la velocidad del agua subterránea influya más que la dispersividad en el transporte de solutos; el acuífero podría transportar los contaminantes rápidamente hacia la costa y de esta manera, autodepurarse a sí mismo.

Reflexiones finales

Los ambientes kársticos, con frecuencia, presentan condiciones de flujo complejas y difíciles de medir con un grado razonable de seguridad, ya que la mayoría de la roca, a través de la cual fluye el agua, contiene suficientes fracturas, fisuras y cavidades de disolución que incrementan su porosidad. En Yucatán, la porosidad secundaria domina la respuesta hidráulica de la masa rocosa; esto da como resultado que la conductividad hidráulica regional sea tan grande como la de un material grueso. Los patrones de flujo, por lo general, son complejos con presencia de trayectorias tortuosas, de tal manera que pueden ocurrir flujos laminares y turbulentos al mismo tiempo.

La estructura geológica regional es un factor fuertemente controlador en la predicción del movimiento de contaminantes, pero la heterogeneidad del acuífero puede ser un problema. Los escenarios de contaminación realistas comparten dos características importantes: (1) las reacciones químicas superficiales, tales como la absorción, son importantes debido a la enorme área interfacial sólido-agua del medio poroso natural; (2) el acuífero muestra una variabilidad espacial tridimensional significativa en permeabilidad a pequeña escala. Las características kársticas son importantes a escala local, ya que han facilitado la disposición de desechos al subsuelo.

Según las Estadísticas del Agua de la CONAGUA (2014), que proporcionan un panorama integral del sector hídrico, el acuífero yucateco no se considera sobreexplotado; sin embargo, el acelerado crecimiento demográfico del estado de Yucatán ha resultado en un incremento en la demanda de servicios, entre los cuales está el acceso al agua potable para uso público y urbano. Las demandas del agua subterránea están creciendo y, teniendo en cuenta los documentados problemas de contaminación que amenazan el acuífero yucateco, los volúmenes del agua subterránea de calidad pueden disminuir por el establecimiento de pozos de abastecimiento, una alta demanda de extracciones y por los cambios del uso del suelo. La expansión de la industria del turismo en la costa yucateca, que conlleva a un rápido crecimiento de la población y alta demanda de agua (Gondwe *et al.* 2010), puede causar la disminución del espesor del agua dulce en la


costa como consecuencia de la ascensión de la interfase salina, producto del bombeo y la infiltración de contaminantes al nivel freático. Los impactos del uso del suelo y de la extracción del agua subterránea no son estáticos con el tiempo o el espacio; por lo tanto, es necesario, para la gestión sustentable de los recursos del agua subterránea, el entendimiento del estado actual y la tendencia de su dinámica. Los modelos de cambio de uso del suelo pueden ayudar a entender la dinámica y proyectar las trayectorias futuras del cambio de uso del suelo, con el fin de orientar las decisiones en cuanto a la gestión del agua subterránea.

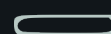
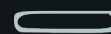
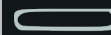
Por todo lo anterior, debe hacerse hincapié en que el desarrollo de estrategias para la protección de los recursos de agua subterránea deben basarse en un firme entendimiento del comportamiento hidrogeológico del acuífero.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo brindado por la Facultad de Ingeniería de la UADY por las facilidades brindadas para llevar a cabo proyectos de investigación, para adquirir conocimiento relacionado con el acuífero yucateco; así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, el Programa para el Desarrollo Profesional Docente para el Tipo Superior de la Secretaría de Educación Pública, así como al Programa de Desarrollo y Consolidación de Cuerpos Académicos de la Universidad Autónoma de Yucatán por el financiamiento otorgado a los integrantes del Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología para realizar investigación.



 *Cenote Dzonot-Ilá, ubicado en el municipio de Abalá, Yucatán. Destaca por las estalactitas bandera de más de 2 metros de altura. Buzo: Juan Baduy. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Capítulo 5

Distribución de las características morfológicas de las depresiones kársticas en el estado de Yucatán (México) a través de un reconocimiento semiautomático de su tipología

Carlos Paredes,¹ Héctor Matos,¹ Eulogio Pardo² y Pedro A. Robledo³

¹Departamento de Ingeniería Geológica y Minera. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, Universidad Politécnica de Madrid

²Instituto Geológico y Minero de España (IGME), Madrid, España

³IGME, Unidad de las Islas Baleares, Mallorca, España

Introducción

En el paisaje de terrenos constituidos por rocas de origen sedimentario y de composición carbonatada, es común que se aprecien oquedades naturales, de profundidad variable, como por ejemplo los lapiaces, con incisiones de orden de centímetros hasta metros, con un modelado de surcos caóticos y desordenados característicos de la escorrentía de lluvia, que pueden alcanzar decenas de metros, formando profundas cárcavas y barrancos. Si la erosión y la disolución se hacen muy intensas, como ocurre en zonas tropicales donde las lluvias son frecuentes y copiosas, surgen pitones, torres o mogotes, entre otras formas. Cuando el subsuelo no es capaz de mantener su estructura, fruto de la disolución, cede ante el peso de los materiales en la superficie, produciéndose depresiones de tamaño variable, algunas de ellas colapsadas, colmatadas o inundadas, que pueden drenarse por cauces de forma más o menos desorganizada o por cuevas y sistemas de drenaje subterráneo, que se conectan con la superficie a través de cuevas, simas o ponores. Estas geoformas se originan principalmente sobre rocas calizas y dolomías (rocas compuestas en su mayoría por calcita y dolomita, respectivamente), por lo general, procedentes de depósitos de origen marino, cuando son atacadas por la acción erosiva del agua infiltrada y por la reacción química de la misma en su contacto con los componentes solubles de ese tipo de rocas, ricas en minerales muy vulnerables y el CO_2 , la disolución se produce a través de zonas de debilidad marcadas en la roca, como fisuras, grietas, diaclasado o fracturas. Este proceso evolutivo es denominado *karstogénesis*, puede presentarse en rocas carbonatadas y en formaciones constituidas por minerales muy solubles en agua como el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), la anhidrita (CaSO_4) y los cloruros (como la halita, NaCl). Estos minerales, originados básicamente por evaporación (rocas evaporíticas), pueden aflorar en porcentajes pequeños, pero su velocidad de disolución es mucho mayor que la de los carbonatos, lo que da lugar a una rápida génesis de huecos y, como consecuencia, su presencia en el medio natural; pueden desarrollar un paisaje de morfología fuertemente marcada (Gutiérrez-Elorza, 2008). Con el paso del tiempo, el proceso de disolución desarrolla conductos (en el subsuelo) y oquedades (en superficie) que son agrandados, siempre y cuando haya agua con un quimismo adecuado para favorecer la disolución, con lo cual aumenta la permeabilidad del medio rocoso y se facilita cada vez más la circulación del agua, con la consiguiente retroalimentación del sistema. Así, se va formando una densa red de conductos, más o menos interconectados entre sí, de diferente forma y tamaño, en un proceso progresivo que se acelera por sí mismo.

Actualmente, gracias a trabajos como los de Jennings (1985), Ford y Williams (2007) y de Radulović (2013) se sabe que el terreno calizo próximo a la superficie, en la denominada zona epikárstica, está

sometido a un efecto combinado de karstogénesis superficial, en la que el agente disolvente proviene principalmente de las aguas de lluvia o de las aguas subterráneas al encontrarse en la zona donde el grado de saturación de agua del acuífero es variable, y el poder de karstificación depende principalmente de su quimismo y su temperatura. Bien sea por la disolución causada por las aguas superficiales o profundas, las cavidades se van ampliando y los hundimientos epikársticos se van agrandando, su techo se va adelgazando hasta que se desploma por su propio peso sobre el hueco subyacente, con el consiguiente hundimiento de la superficie del terreno y la formación en éste de los "sumideros" o "dolinas". Se trata de depresiones del terreno cerradas, de forma circular o elipsoidal en planta, con bordes relativamente suaves (en forma de artesa o cubeta) según la profundidad de la depresión, tendidos (formando embudos) o escarpados (como un pozo de aspecto cilíndrico), de acuerdo con una de las primeras clasificaciones según Cvijic (1893), con diámetros que pueden ir desde metros, hasta un kilómetro, en las que puede aflorar el agua procedente del acuífero subyacente, ya que su profundidad puede alcanzar más de un centenar de metros.

Las dolinas pueden encontrarse aisladas o en grupos, formando campos de dolinas; en este segundo caso, cuando por el paso del tiempo y la disolución y/o el colapso de algunas dolinas próximas entran en coalescencia, juntando sus paredes y fondos, se forman las denominadas *uvalas*, término croata que sirve para designar depresiones kársticas cerradas y elongadas o irregulares, formadas por la coalescencia de varias dolinas (Sweeting, 1973) resultado de la disolución acelerada a lo largo de las zonas en las paredes tectónicamente debilitadas (Ćalić, 2011).

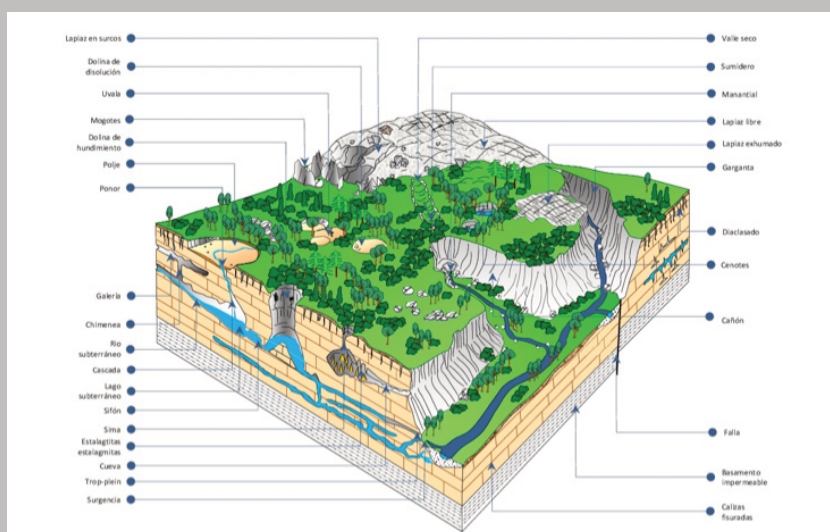


Figura 1. Diagrama de los elementos geomorfológicos propios del paisaje kárstico, debidos a procesos de disolución endógena y exógena (modificado a partir de Bakalowicz, 1999).

Con una dimensión mucho mayor, los poljes (término de origen eslavo) son depresiones desconectadas entre sí de origen poligenético según Sauro (2012), resultado, en la mayoría de los casos, de la actuación de varios procesos geomorfológicos sobre el paisaje kárstico, aunque algunos tienen un origen ligado exclusivamente a los procesos de disolución lateral que ensanchan y agrandan la planicie deprimida o a una tectónica local o regional. Morfológicamente, son cuencas cerradas de gran extensión (normalmente de 5 a 400 km²) cuyo eje mayor puede llegar a varias decenas de kilómetros. En algunos casos, se encuentra habitualmente alineado con las principales direcciones estructurales neotectónicas (White & Culver, 2012). En ciertos casos, dependiendo del régimen de lluvias, de la escorrentía superficial, del caudal de los manantiales (surgencias kársticas) que suelen situarse en el borde del polje y del posible ascenso en el nivel freático del acuífero subyacente, los poljes pueden inundarse si se supera la capacidad de evacuación del ponor o sumidero kárstico y de la capacidad de infiltración. En el interior del polje puede igualmente darse la ocurrencia de dolinas y uvalas por donde penetra el agua, al crear superficies endorreicas.

La mayoría de los territorios kársticos, tanto en latitudes subtropicales y tropicales, presentan esta variedad de depresiones como rasgo más característico y destacable en superficie. La distribución de sus tamaños abarca un amplio rango de escalas que van desde centímetros, para los pocillos de lluvia, las marmitas de tamaño métrico, dolinas, uvalas, de varios kilómetros, hasta los poljes con varias decenas de kilómetros de extensión. Para entender cómo las dolinas y, en general, todas las grandes depresiones cerradas se desarrollan, es necesario examinar (Sauro, 2012) su forma (en planta y en sección) y su tamaño, su ubicación y relación con respecto al relieve, la geomorfología circundante, las estructuras, en forma de fallas, de fracturas, diaclasas u otras discontinuidades que surcan el terreno, su relación hidrogeológica con el acuífero, los procesos de disolución u otros que intervengan en la karstogénesis, y las condiciones medioambientales y climáticas en las que se desarrollan. De todo este conjunto de elementos, este trabajo se centra en el primero: la morfología y el tamaño de las depresiones kársticas, es decir, su morfometría planimétrica.

Los estudios morfométricos realizados sobre paisajes kársticos se llevan realizando desde los años setenta, a partir de los trabajos de Williams (1972), White y White (1979), Gracia (1986), Gracia-Prieto (1991) y Brinkmann *et al.* (2008), entre otros. Entre los primeros, la mayoría de los estudios se encontraban limitados a un conjunto de medidas obtenidas a partir de campañas de campo o mapas topográficos y geomorfológicos elaborados a gran escala (Lyew-Ayee *et al.*, 2007; Bruno *et al.*, 2008; Basso *et al.*, 2013), por lo que la mayoría de las áreas estudiadas eran relativamente pequeñas y accesibles por el hombre para llevar a cabo el levantamiento topográfico que permitía un

reconocimiento de las formas kársticas en detalle. Sin embargo, cuando el estudio se abordaba sobre grandes extensiones, los análisis geomorfológicos realizados eran muy generalistas (Lugo-Hubp *et al.*, 1992; García, 1990).

Ha sido gracias a los recientes avances tecnológicos, tales como los sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de posicionamiento global (GPS), los modelos digitales de elevaciones (MDE) y otros datos del amplio espectro electromagnético registrados de forma remota mediante diferentes técnicas de teledetección aerotransportada o satelital, que se ha permitido llevar a cabo estudios morfométricos de mayor detalle y uniformemente sobre zonas extensas, ayudando a profundizar nuestro conocimiento en el origen y la naturaleza de los terrenos kársticos, los principios que regulan la karstogénesis, así como de los factores medioambientales y antrópicos que influyen (Denizman y Randazo, 2000; Shofner *et al.*, 2001; Hung *et al.*, 2002; Florea, 2005; Lyew-Ayee *et al.*, 2007; Huang, 2007; Gao y Zhou, 2008; Galve *et al.*, 2009; Siart *et al.*, 2009). Los trabajos cartográficos realizados sobre plataformas SIG en este tipo de terrenos son relativamente recientes, aunque se han mostrado muy versátiles y populares al permitir trabajar con información geográfica tanto de la superficie (endokarst) como del interior (endokarst), ayudando a establecer las relaciones y conexiones existentes entre superficie y profundidad (Szukalski, 2002; Gao, 2008; Siart *et al.*, 2009).

Entre los diferentes tipos de información manejada con los SIG, los MDE han demostrado, a través de múltiples estudios y resultados obtenidos, su enorme utilidad para el análisis morfológico de la superficie terrestre, principalmente en áreas abruptas e inaccesibles. Sin embargo, se puede constatar que el uso exclusivo de los MDE, modelos combinados con imágenes aéreas, resulta insuficiente para una caracterización automática de ciertos elementos superficiales propios de los sistemas kársticos, de distribución compleja e irregular y, a veces, enmascarada por los errores propios del MDE, como son las depresiones y hundimientos, principalmente dolinas, cenotes, uvalas y otros elementos de tamaño pequeño que necesitan de otras técnicas de mayor resolución para su detección (Shofner *et al.*, 2001; Gutiérrez-Santolalla *et al.*, 2005; Siart *et al.*, 2009; Gutiérrez *et al.*, 2014). En este sentido, por ejemplo, Siart *et al.*, (2009) sugiere una aproximación alternativa mediante la combinación del análisis espacial de diferentes capas de información geográfica, apoyado y validado con campañas de campo que se contrasten con los resultados analíticamente obtenidos sobre el SIG.

Numerosos estudios se han centrado en el análisis de la distribución espacial de las depresiones kársticas, muchos de ellos utilizan mapas de densidad como la aproximación más adecuada para describir

geoestadísticamente su comportamiento (Denizman, 2003; Angel *et al.*, 2004; Farfán *et al.*, 2010; Lindsey *et al.*, 2010). Otros estudios se centran en la descripción y clasificación de la tipología de las formas exógenas del modelado superficial en macizos carbonáticos, pavimentos, klints, grykes, lapiaces, torres, tormos, barrancos, cañones y, particularmente, de las depresiones en paisajes kársticos, diferenciando entre simas, cenotes, dolinas, uvalas y poljes (Plan *et al.*, 2009; Siart *et al.*, 2009; Goeppert *et al.*, 2011; Fragoso-Servón *et al.*, 2014; Pepe y Parise, 2014).

En la superficie, los terrenos kársticos son excelentes captadores de la recarga por su gran capacidad de infiltración en el subsuelo. Permiten que el agua infiltrada fluya fácilmente a través de una red de oquedades de una amplia gama de tamaños interconectados, por las cuales discurren, en muchos casos, verdaderos ríos subterráneos. Éstos suelen ser muy interesantes para la captación del agua subterránea, por su gran transmisividad, que se traduce en pozos con una producción de alto caudal y rendimiento. En lo que respecta a la gestión de estos terrenos, muchos son importantes en cuanto a la planificación del uso que se les da, al mismo tiempo que se encuentran directamente relacionados con la vulnerabilidad de los acuíferos subyacentes (Bautista *et al.*, 2011), bien frente a posibles fuentes de contaminación, bien porque se usan como recursos turísticos, o porque se encuentran directamente ligados a ciertos riesgos geológicos como los colapsos del terreno, subsidencias, o inundaciones, entre otros.

El fenómeno de karstificación se distribuye ampliamente sobre el planeta; así, uno de los sistemas kársticos en calizas más extenso del mundo se encuentra en la llanura de Nullarbor en Australia. Eslovenia está declarado como el país con el riesgo más alto del mundo por sumideros y colapsos, mientras que el segundo puesto lo tiene Estados Unidos en el borde occidental del altiplano Hightland Rim. México alberga una de las regiones kársticas más interesantes del mundo localizada en la península de Yucatán y en Chiapas. Precisamente aquí es donde se encuentran las depresiones más llamativas, tan espectaculares como vulnerables, gracias a las condiciones geológicas, climáticas e hidrogeoquímicas que han favorecido su formación, con dimensiones desde unos cuantos centímetros hasta decenas de metros de diámetro y con profundidades cercanas a los 100 m. Algunas son de gran belleza y la historia de los pueblos nativos de la región se encuentra íntimamente ligada a su distribución y excepcionalidad geológica en el Golfo de México. En la actualidad, muchas de estas formas del terreno son utilizadas como recurso turístico, destacan las Grutas de García, en Nuevo León; la "poza" de Cuatro Ciénegas, las "abras" de Torreón, los pozos brotantes de la Sierra del Burro, en Coahuila; las grutas de Cacahuamilpa, en Guerrero, y las aguadas, hondonadas, rejolladas o cenotes, que son dolinas de colapso inundadas, cuyo fondo se

encuentra bajo una lámina de agua mostrando su relación directa con el acuífero subyacente que, en la región de la península de Yucatán, reciben el nombre del término derivado del maya: *tz'onot* o *d'zonot*, que significa "caverna con depósito de agua".

Por la importancia sociocultural, ambiental y paisajística de la zona, existen muchos estudios previos realizados sobre la península de Yucatán que permiten reconocer una enorme diversidad de formas kársticas. Entre los primeros que se llevaron a cabo, en los trabajos de Cole (1910) y Finch (1965), se logran describir, a pesar de la importante falta de recursos topográficos y la accesibilidad a zonas remotas, diferentes tipos y concentración de formas kársticas, especialmente hoyas, aguadas, ojos de agua, cenotes, estableciendo una zonación de su distribución sobre ciertas áreas de Yucatán: la costera, la central (repartido en tres, norte, este y oeste, según la tipología observada de sus depresiones) y la montañosa (en la Sierrita de Ticul). A partir de estos autores, se desarrollaron posteriormente otros estudios sobre el paisaje kárstico de la zona y sus formas, a pequeña (1:1.2 millones; Lugo-Hubp *et al.*, 1992; García, 1990) y media escala (1:500 000) (Bautista-Zúñiga *et al.*, 2003; Bautista *et al.*, 2005), con los que fue posible distinguir dos regiones fisiográficas geomorfológicamente diferenciadas. La primera se trata de una gran meseta en la mitad nordeste de la península y la segunda, hacia el sur, se caracteriza por un sistema de mesetas alternando con bajas colinas.

Los estudios demuestran que, a escala regional, muchos de los cenotes más importantes están alineados y concentrados en una faja semicircular con alta densidad de fracturas, que pasó a denominarse Anillo de Cenotes, y que fue asociado al borde del cráter Chicxulub (Perry *et al.*, 1995; Connors *et al.*, 1996), resultado del impacto de un gran meteorito de unos 10 km de diámetro a finales del Cretácico. La localización de los cenotes no es consecuencia exclusiva del Anillo, también se encuentran densamente distribuidos por el distrito fisiográfico de Chichén Itzá. Una cuestión, aún pendiente de aclarar, es la determinación de las características geológicas, geoquímicas, estructurales y los procesos asociados que han condicionado el desarrollo de estos cenotes, y su aparente propagación ascendente durante su génesis. En este sentido, Monroy-Ríos y Beddows (2015) sugieren un modelo conceptual para la génesis del Anillo de Cenotes. La circulación convectiva hidrogeotérmica de los fluidos a lo largo del borde del cráter y sobre las secuencias de carbonatos post-impacto daría lugar a una disolución espacialmente distribuida, con la formación de huecos iniciados en profundidad y de propagación ascendente que, a menudo, romperían la superficie, lo que explicaría su karstogénesis organizada espacialmente, a diferencia de la que se encuentra en el resto del territorio del estado.

Los estudios previos han reconocido que diferentes tipos de depresiones kársticas son muy abundantes en las amplias mesetas del nordeste de Yucatán; sin embargo, la cantidad, su distribución espacial y su caracterización no han sido analizadas con suficiencia y no existe un catálogo completo de éstas, a pesar de su enorme importancia para una adecuada gestión del territorio y, principalmente, para proteger los recursos de hídricos subterráneos que sirven de suministro de agua potable a las poblaciones. Hasta el momento, hay más de 7000 cartografiadas en el área noroccidental de la península (Steinich, 1996; Fragoso-Servón *et al.*, 2014, Bautista *et al.*, 2016). Concretamente, en este inventario de depresiones se tiene constancia de que los cenotes juegan un papel muy importante en la contaminación de los acuíferos (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015).

Estas piscinas naturales han sido utilizadas desde antaño, en la época prehispánica (de acuerdo con diversas investigaciones; por ejemplo, ver capítulos 7 y 16 de esta misma obra), como lugares de culto y misticismo y, en el presente, como activos turísticos o como balnearios. Además, es lamentable que, en la actualidad, son utilizados como vertederos de basura o como pozos receptores de aguas residuales, en especial los de mayor tamaño por su capacidad y los más cercanos a los núcleos urbanos. Los de menor tamaño, muy numerosos y ampliamente diseminados, pueden ser también receptores de aguas residuales y propician la contaminación difusa generada por el retorno de agua utilizada en las zonas agrícolas y pecuarias.

Por otra parte, al tratarse de una formación kárstica que se extiende sobre un vasto territorio, es muy probable que posea grandes áreas deprimidas, aún no cartografiadas por su leve desnivel o por su inaccesibilidad, que son muy relevantes, ya que con una leve variación de cota, por su tamaño, las aguas que drenan pueden ser capaces de recoger contaminantes distribuidos en un área muy importante, no sólo la puntual como ocurre a través de los cenotes. Por ello, el mayor riesgo de los acuíferos que se encuentran conectados a través de la extensa red kárstica subterránea y con la superficie a través de cenotes y dolinas, no sólo es la sobreexplotación, sino la enorme dispersión de la contaminación que, de hecho, ha estado ocurriendo desde hace mucho tiempo, con un impacto rara vez notable hasta ahora, gracias a que el agua contaminada se diluye, se disemina y es rápidamente desalojada debajo del acuífero, en dirección NW hacia el Mar Caribe.

La península de Yucatán está sujeta a un rápido desarrollo urbano, casi explosivo en la zona costera, particularmente a lo largo del litoral caribeño; por ello, la gestión adecuada de este gran ecosistema es imprescindible y la sostenibilidad del agua dulce, así como la calidad del agua costera, son temas de gran preocupación.

Para comprender cómo se desarrollan las dolinas y, en general, todas las depresiones kársticas, grandes y pequeñas del estado de Yucatán, o de cualquier otro territorio kárstico, es necesario examinar las siguientes cuestiones: (1) su morfología y tamaño, (2) su ubicación y relación con el entorno topográfico y geomorfológico, (3) su estructura, (4) su comportamiento hidrológico y procesos de solución relacionados, (5) otros procesos que juegan un papel en su evolución, (6) ejemplos de evolución y (7) morfologías peculiares que ocurren bajo condiciones ambientales específicas. Ante tan amplísimo espectro de estudios necesarios, este trabajo se desarrolla para abordar el primer aspecto mencionado: el estudio de su morfología, con el que se va a enriquecer la información cartográfica existente respecto a las depresiones kársticas dentro del estado de Yucatán (México), lo cual es de interés para fines científicos, socioeconómicos, turísticos y medioambientales. Esta información geográfica va a ser obtenida a partir de un análisis de los catálogos públicos existentes sobre depresiones kársticas en Yucatán, para luego ser contrastada con la que se obtenga mediante el análisis y tratamiento del MDE disponible sobre el estado, y explotada para estudiar las diferencias morfométricas entre dolinas, cenotes, uvalas y poljes que permitan su taxonomía. Para ello, en primer lugar, se describen las características geográficas, geológicas y geomorfológicas más relevantes del área de estudio con las que se establece un encuadre geológico, estructural y litológico de las depresiones catalogadas y las que luego sean identificadas analizando el MDE.

A continuación, se describen las dos técnicas de análisis utilizadas para la detección de depresiones y la jerarquización de los elementos localizados sobre los catálogos disponibles con depresiones kársticas cartografiadas. Previamente, se depurarán los inventarios, para evitar conflictos con la información que proporciona el MDE y así crear el catálogo de proyecto. Para su clasificación, se han seleccionado los parámetros morfométricos más relevantes utilizando una técnica de agrupación jerárquica (Kaufman y Rouseeuw, 1990) sobre los índices determinados para cada elemento de los catálogos y con los cuales se han establecido las agrupaciones en dolinas/cenotes, uvalas, poljes y grandes depresiones, mediante una técnica de agregación por reasignación tipo k-medias (Kaufman y Rouseeuw, 1990). Para analizar la validez de la clasificación obtenida, se lleva a cabo un estudio estadístico comparativo de la distribución sobre los parámetros morfométricos de las depresiones así catalogadas, con las obtenidas del análisis directo del MDE. Finalmente, se interpretan los cálculos realizados y se discuten los resultados obtenidos para extraer las conclusiones más relevantes sobre los criterios de taxonomía de las depresiones kársticas en el estado de Yucatán y las características más notables en la distribución de los mismos, la metodología aplicada y la trascendencia de los resultados obtenidos sobre el conocimiento y protección medioambiental de estas formaciones y los recursos hídricos asociados.

Las depresiones y las nuevas tecnologías de información geoespacial

En la bibliografía analizada sobre el estado de Yucatán, se han reconocido varios intentos de catalogar las formaciones exokársticas, concretamente los cenotes y las lagunas, habida cuenta de su interés geológico, histórico, cultural y medioambiental.

Aunque el número constatado hasta la fecha es superior a los 7000 cenotes distribuidos en la toda la península, no es posible su estimación exacta, ya que pueden desarrollarse, surgir nuevos o colmatarse algunos más antiguos; además, otros muchos se encuentran ocultos bajo la espesura del bosque tropical, esto hace que estén aún sin ser localizados, salvo que se encuentren durante algún recorrido o expedición.

Desde la perspectiva de los recursos hídricos peninsulares, los cenotes, los cuerpos de agua (lagos y lagunas permanentes o transitorias) y algunas depresiones están recogidas en diversos catálogos sin unificar, otros sin contrastar o incompletos por los motivos indicados. Estos catálogos, utilizados en este trabajo con el propósito de la clasificación, síntesis, unificación y mejora de su completitud, son los siguientes:

Catálogo de cenotes: elaborado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del gobierno de Yucatán (SEDUMA, 2015), que recoge la posición de 775 puntos que se encuentran dentro del estado, identificados por la administración pública como cenotes (imagen en el recuadro de la **Figura 2**, inciso **a**).

La base de datos contiene las coordenadas de los puntos en formato .shp de ArcGis. Originalmente, las coordenadas se encuentran sobre la proyección Internacional Terrestrial Reference 1992 (ITRF 92), las cuales han sido transformadas a UTM en WGS 84 (**Figura 2**, inciso **a**) para su homogeneización con el resto de las bases de datos con las que aquí se ha trabajado.

Catálogo de cuerpos de agua: a partir de la síntesis realizada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016), sobre los 58 mapas escala 1:50000, que cubren el territorio del estado de Yucatán, se han extraído 2231 elementos en forma de polígonos cerrados con la característica singular de que, según su descripción, en algún momento tienen presencia de agua (imagen en el recuadro de la **Figura 2**, inciso **b**).

La información se encuentra en un fichero tipo .shp formato de ArcGis y en la proyección original Internacional Terrestrial Reference 1992 (ITRF 92), la cual se transformó a UTM WGS 84 para su posterior representación (**Figura 2**, inciso **b**) tratamiento con el resto de los catálogos.

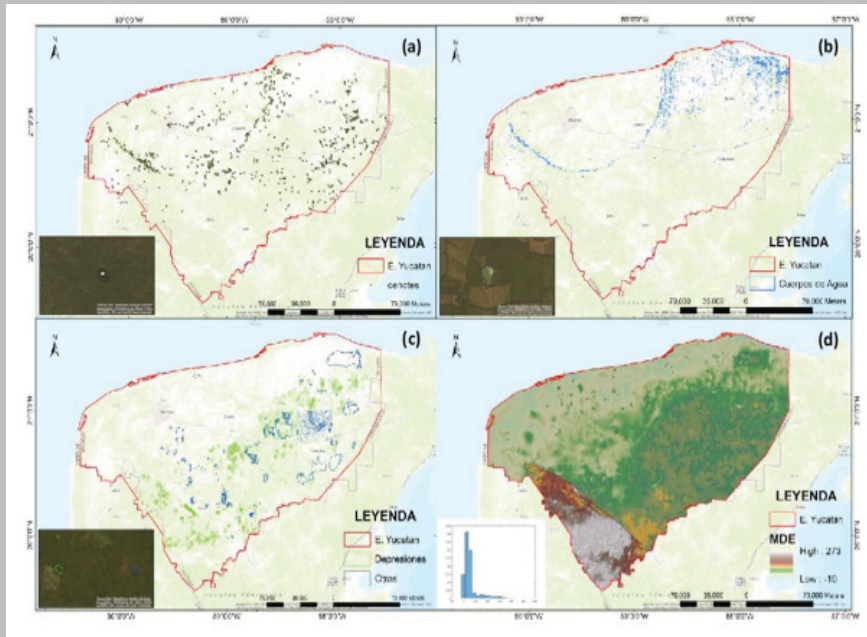


Figura 2. Bases de datos geográficas utilizadas: a) Catálogo de la SEDUMA, con 775 cenotes, b) catálogo del INEGI con 2231 cuerpos de agua, c) catálogo de curvas poligonales tipo depresiones (4562) y tipo otras (7404) compiladas del mapa topográfico 1:50 000, d) Modelo Digital de Elevaciones y distribución hipsométrica (histograma en recuadro) en Yucatán.

Desde el punto de vista de los recursos hídricos, se ha mencionado que los estudios hidrogeológicos llevados a cabo en la península ponen de manifiesto la existencia de importantes superficies endorreicas que captan las aguas superficiales hacia los acuíferos, que no sólo son cenotes y lagunas. Estas depresiones son mucho más difíciles de reconocer directamente en superficie, salvo que muestren una lámina de agua en periodos de inundación, lo cual en terrenos kársticos es un hecho relativamente improbable, salvo por un corto periodo de tiempo, como muestra el hecho de la ausencia de cursos fluviales en la península. Es propio de estos lugares que todo lo que llueve pasa, mientras se infiltra, al subsuelo.

Los catálogos existentes de las mismas están limitados a una recopilación realizada sobre el reconocimiento de las curvas de nivel sobre el mapa topográfico que delimitan algunas de estas depresiones. Uno de ellos está recogido en el catálogo llamado *Curvas de nivel*, procedente de la integración de los 58 mapas topográficos a escala 1:50 000, elaborada por el INEGI (2016). Este catálogo consta de 33 809 curvas de nivel cerradas, en forma de polígonos, dentro del estado de Yucatán.

Cabe mencionar que éstas, en su descripción, se subdividen o identifican en dos subgrupos: curvas tipo depresiones y curvas tipo otras, de las que se desconoce su relación con el terreno (imagen en el recuadro de la **Figura 2**, inciso **c**). Los datos se encuentran en la

proyección original *International Terrestrial Reference 1992* (ITRF 92), lo cual se transformó en WGS 84 (**Figura 2**, inciso **c**) para la homogeneización de las bases de datos. De acuerdo con la descripción que proporciona el INEGI, el catálogo de curvas de nivel está incompleto e indefinido en muchos de los objetos poligonales que contiene, por lo que es necesario, antes de su estudio, identificar las incertidumbres y suprimir los errores o conflictos que tuviera con el terreno que representa, para lo cual se utilizarán herramientas que analicen el modelo digital disponible de elevaciones de la zona.

El modelo digital de elevaciones de Yucatán, utilizado en este trabajo, es el que se encuentra publicado desde 2013. Proviene del proyecto de Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0 (CEM 3.0) elaborado por el INEGI, en el que se recogen los modelos del relieve continental e insular. El soporte informático que contiene el MDE se encuentra en formato .bil (conjunto de archivos con el mismo nombre y diferentes extensiones: .bil, .stx, .hdr, etcétera) y referido al datum ITRF 92 época 1988.0, elipsoide GRS80, en coordenadas geográficas. El MDE (**Figura 2**, inciso **d**) tiene una resolución espacial planimétrica de 15 m por pixel y, en la vertical, la hipsometría se refiere en metros, con una precisión de 1 m. El rango de elevaciones varían entre -10 m hasta 273 m, con una elevación media de 26.36 msnm (histograma en recuadro de la **Figura 2**, inciso **c**).

La aplicación de técnicas geoespaciales en la investigación de los cenotes de Yucatán

La metodología que se ha aplicado en este trabajo para la detección, taxonomía y síntesis de depresiones se divide en tres etapas (**Figura 3**). La primera corresponde con el preprocesado de la información disponible mediante el cual se adapta la proyección geográfica de las bases de datos a una proyección y sistema de referencia común, además se revisa la descripción y tipología de los datos, para ser asignada o corregida en aquellos que corresponda. Asimismo, se hacen los cálculos necesarios sobre el MDE, tanto para llevar a cabo el depurado de catálogos, como para crear las bases de datos de depresiones obtenidas del análisis del MDE. De este preprocesado se obtienen las bases de datos geográficas de proyecto que contienen cada uno de los cuerpos o depresiones consideradas, todas ellas delimitadas por una curva poligonal cerrada de la que se extraerá la información morfométrica necesaria para su clasificación.

En la segunda etapa, se han seleccionado una serie de índices morfométricos para caracterizar el perfil de los cuerpos recopilados en cada una de las bases de datos. Estos índices corresponden con los habitualmente utilizados para parametrizar la forma. A continuación, se lleva a cabo un estudio estadístico descriptivo de los índices de la

población que constituye cada base de datos, estableciendo las transformaciones necesarias para la determinación de los índices que sean más relevantes y menos redundantes en cuanto a la información aportada para la clasificación.

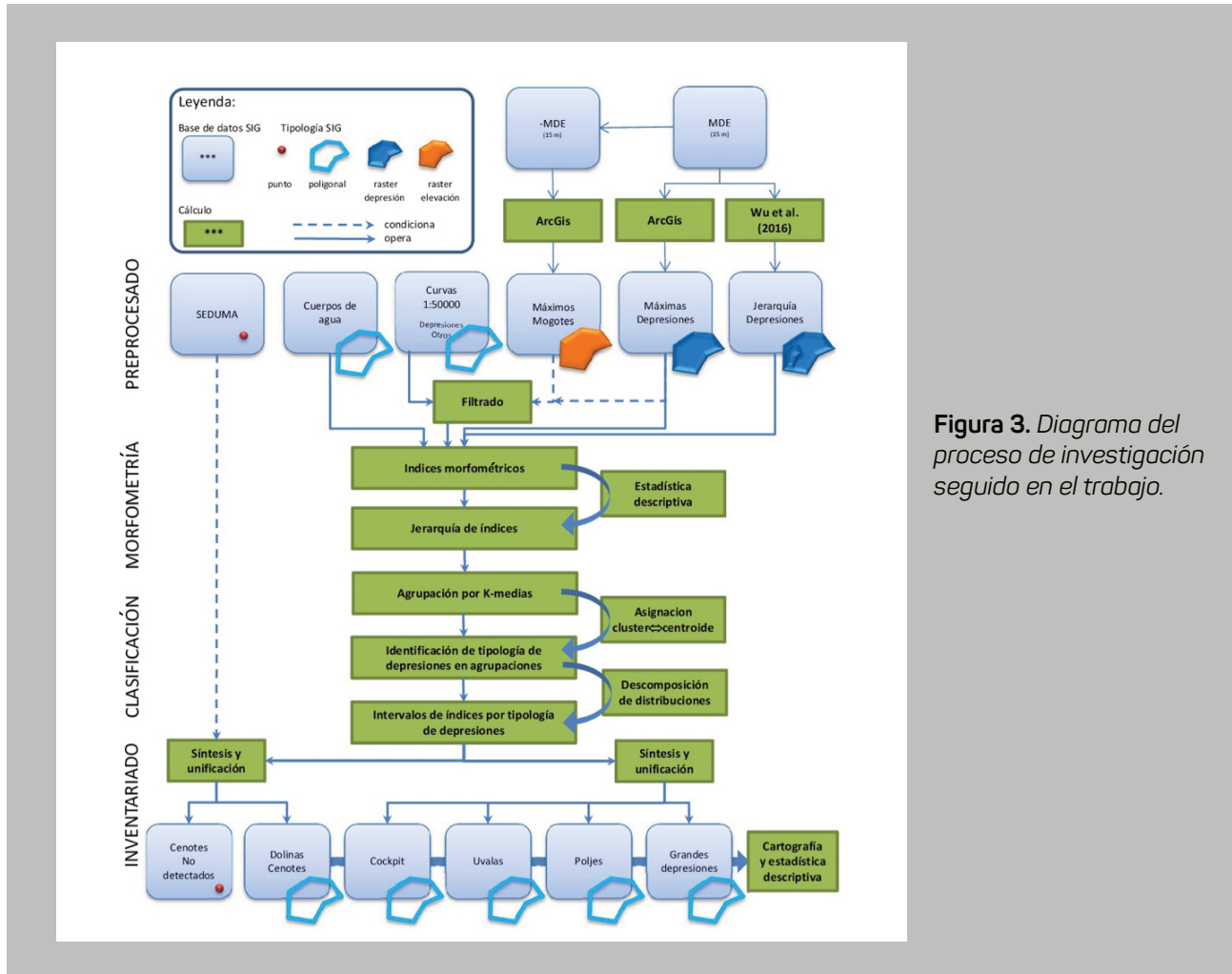


Figura 3. Diagrama del proceso de investigación seguido en el trabajo.

En la etapa de clasificación, se utilizan los índices seleccionados para agrupar la población de depresiones, contenida en cada base de datos, en subconjuntos de características morfométricas comunes. Asimismo, se determinará qué morfología kárstica (cenote/dolina, uvala, polje y gran depresión) corresponde a cada uno de estos subconjuntos y se agruparán los subconjuntos que, proviniendo de distintas bases de datos, corresponda con la misma morfología kárstica. De esta forma, se crea una base de datos para cenotes, uvalas, poljes y depresiones, como síntesis integrada de las que corresponden en cada base de datos. Para terminar, se detallará la distribución de las características morfométricas globales de cada una de las morfologías obtenidas tras la síntesis.

Descubriendo las depresiones ocultas del estado de Yucatán

De acuerdo con el esquema de trabajo planteado en la **Figura 3**, para la obtención del catálogo sintético exhaustivo de depresiones sobre el estado de Yucatán, se ha aplicado el algoritmo de llenado implementado en ArcGis, utilizando el MDE a una escala de 15 m, con el que se han obtenido en bruto un total de 19087 depresiones que se distribuyen (**Figura 4**, inciso **a**) sobre una extensión total de más de 9000 km², lo que constituye algo más del 20% de la superficie del territorio del estado. Las depresiones detectadas con esta técnica tienen fiel reflejo en la imagen de la superficie, como muestra el recuadro en la **Figura 4**, inciso **a**, para el que se representa una depresión detectada y la zona correspondiente en superficie. Tras este primer análisis, se aprecia que 4698 de estas depresiones (el 24% de la población identificada) tienen una extensión total de 312 m², 1441 objetos (el 7%) con 625 m² y 707 con 937 m² (un 5%), lo que implica que casi el 36% de la población detectada tiene una superficie inferior a 1000 m². Estas pequeñas depresiones corresponden a tamaños de uno, dos o tres píxeles sobre el MDE. Tamaños superiores poseen una distribución de frecuencias más acorde con el resto de catálogos, especialmente a partir de los 5000 m², por lo que tamaños inferiores pueden estar fuertemente condicionados por la calidad del MDE. Para depurar el alto contenido atípico en depresiones pequeñas, se han descartado aquellas o porciones de éstas cuya profundidad es de 1 m, error en la vertical del MDE, las que son de un tamaño inferior a 1000 m², y se ha suavizado su contorno, simplificando el perímetro, lo que ha dado lugar a un catálogo de 5865 objetos de máximas depresiones.

La revisión del contenido de los catálogos, frente al resultado en bruto de ArcGis y a la correspondencia geográfica sobre el terreno, indica que el inventario de 775 cenotes de la SEDUMA no puede ser preprocesado al tratarse de objetos puntuales, sólo serán utilizados en la última fase para la unificación del catálogo de dolinas, por lo que se excluye del proceso tal y como se indica en la **Figura 3**; igualmente se ha comprobado que las 2231 poligonales contenidas en el catálogo *Cuerpos de agua* abarcan mayormente pequeñas extensiones, comprendidas entre los 103 y 104 m², resultando ser el catálogo que contiene los objetos más pequeños, de difícil detectabilidad sobre el MDE. Sin embargo, al estudiar los polígonos cerrados procedentes de los mapas topográficos 1:50000 del INEGI y los recogidos en los catálogos de depresiones, entre otros, se observa que, para el primero, hay algunas curvas que no encierran depresión o que se ubican lateralmente a éstas y, para el segundo, ninguna de las curvas se encuentra identificada como depresión. Para el depurado de ambos catálogos, se utilizó el resultado de depresiones en bruto inicialmente obtenido con ArcGis y, con el mismo procedimiento de cálculo en ArcGis, pero aplicado al MDE, se ha obtenido la distribución de cerros o mogotes

kársticos (**Figura 4**, inciso **a**). El tratamiento aplicado verifica que la curva encierra en su interior más del 50% en extensión de depresión y descarta aquellas que se encuentran recubriendo al menos un 50% de un mogote. Tras la eliminación de los objetos conflictivos, los catálogos resultantes contienen 3737 depresiones en el primero y se han asignado 2153 depresiones en el de otras.

La aplicación del método diseñado en Wu *et al.* (2016) sobre el MDE del estado de Yucatán, teniendo en cuenta las características del MDE utilizado (la profundidad mínima reconocible es de 1 m y la extensión mínima para la resolución del MDE es mayor de 100 m²), se han obtenido 8157 depresiones (**Figura 4**, inciso **b**), algo menos de la mitad de las que se obtuvieron con ArcGis, y con hasta 12 niveles jerárquicos, si bien, a partir del nivel 8, son muy pocas las depresiones obtenidas (3 de nivel 8 y una en cada nivel del 9 al 12). En los resultados es posible reconocer que depresiones de nivel 2 y superior pueden ser útiles para la identificación de uvalas, como en el recuadro inferior izquierdo de la **Figura 4**, inciso **b**, en cuya imagen se muestran las dos dolinas (de nivel 1), más oscuras en su centro y delimitadas por las curvas negras, que coalescen a menor profundidad, para formar una uvala señalada por la curva en rojo (de nivel 2). Para la región objeto de estudio en la que se representa el MDE con una precisión altimétrica de 1 m, el espaciado entre las líneas de contorno utilizadas para la creación del árbol jerárquico de depresiones es 1 m, lo que puede afectar en la detección de las depresiones más superficiales, al quedar encubiertas por el límite de profundidad, ya que estas depresiones quedarán ausentes del mapa de curvas de nivel, a pesar de que éstas puedan existir en la realidad.

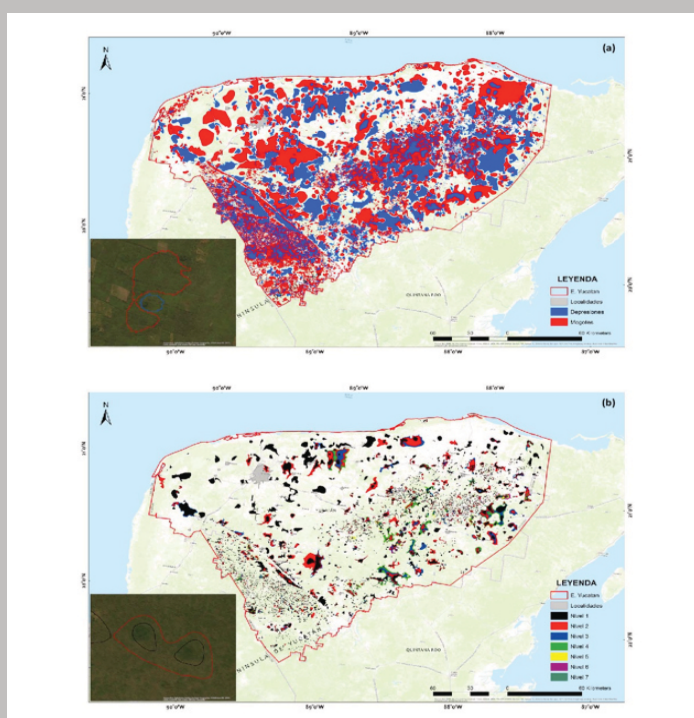


Figura 4. a) Distribución de depresiones (áreas en azul) y mogotes (áreas en rojo) que se han obtenido a partir del MDE de 15 m sobre el estado de Yucatán, utilizando el algoritmo de llenado de ArcGis con el que se obtienen las máximas depresiones. b) Distribución jerárquica (nivel 1 más interior, nivel 8 más exterior) de las áreas de depresión obtenidas tras la aplicación del algoritmo de Wu *et al.* (2016).

Tras el preprocesado de los catálogos (según las fases indicadas en la **Figura 3**), se ha llevado a cabo la determinación de los índices morfométricos sobre las poligonales cerradas que delimitan el borde exterior de las depresiones, bien sobre los objetos contenidos en los catálogos de cuerpos de agua, depresiones y otros, como los que se han extraído a partir del trazado del borde que delimita un conjunto de píxeles que forman una depresión, tras analizar el MDE y depurar el resultado, con los algoritmos de ArcGis del que se obtienen las máximas depresiones y de Wu *et al.* (2016).

Tabla 1. Estadística descriptiva de los índices morfométricos de los objetos inventariados en los diferentes catálogos CAT: a) cuerpos de agua, b) depresiones 1:50000, c) otras 1:50000, d) ArcGis y e) Wu *et al.* (2016).

ÍNDICE	CA T.	Estadística descriptiva								
		Media	Varianza	Sesgo	Kurtosis	Mínimo	P 25%	Mediana	P 75%	Máximo
Log ₁₀ Área	a)	3.567	0.144	-0.30	5.744	2.100	3.424	3.575	3.768	5.680
	b)	4.122	0.510	0.903	3.570	2.557	3.623	3.962	4.532	6.923
	c)	3.734	0.530	2.194	10.11	2.462	3.302	3.560	3.893	8.590
	d)	3.755	1.264	0.680	2.905	2.495	2.796	3.641	4.559	8.603
	e)	4.736	0.813	0.682	3.794	2.059	4.109	4.621	5.216	8.399
Log ₁₀ Perímetro	a)	2.354	0.038	0.062	6.414	1.617	2.277	2.353	2.449	3.513
	b)	2.670	0.177	1.186	4.316	1.861	2.377	2.553	2.885	4.503
	c)	2.469	0.183	2.434	10.98	1.861	2.223	2.348	2.533	5.451
	d)	2.581	0.422	0.742	3.226	1.849	2.025	2.502	3.025	5.788
	e)	3.043	0.289	0.948	4.091	1.663	2.659	2.946	3.315	5.410
Log ₁₀ Ancho	a)	1.800	0.036	-0.44	5.605	0.989	1.731	1.807	1.904	2.877
	b)	2.063	0.129	1.049	4.057	1.295	1.819	1.981	2.244	3.589
	c)	1.871	0.137	2.275	10.51	1.244	1.655	1.788	1.946	4.361
	d)	1.858	0.351	0.688	2.854	1.247	1.247	1.849	2.288	4.468
	e)	2.366	0.222	0.695	3.890	0.841	2.052	2.299	2.601	4.353
Log ₁₀ Largo	a)	1.873	0.040	0.223	6.513	1.105	1.790	1.870	1.966	3.079
	b)	2.193	0.170	0.966	3.512	1.340	1.897	2.079	2.426	3.716
	c)	1.991	0.167	2.062	8.603	1.372	1.741	1.877	2.081	4.555
	d)	2.024	0.408	0.500	2.667	1.247	1.548	2.025	2.477	4.651
	e)	2.544	0.253	0.737	3.614	1.247	2.165	2.464	2.823	4.487
Circularidad	a)	1.052	0.010	7.192	72.30	1.005	1.018	1.027	1.043	2.496
	b)	1.176	0.103	4.420	31.49	1.008	1.031	1.053	1.160	5.217
	c)	1.153	0.096	5.219	40.04	1.009	1.032	1.051	1.108	4.734
	d)	1.479	0.259	4.395	35.90	1.128	1.128	1.347	1.579	9.446
	e)	1.401	0.377	7.735	122.9	1.003	1.099	1.227	1.492	18.13
Alargamiento	a)	1.207	0.081	4.092	26.98	1.0	1.051	1.122	1.243	4.115
	b)	1.408	0.226	2.672	14.31	1.0	1.102	1.240	1.538	5.879
	c)	1.369	0.186	2.593	13.44	1.0	1.097	1.215	1.466	5.670
	d)	1.611	0.719	2.873	15.63	1.0	1.0	1.333	1.999	10.99
	e)	1.604	0.414	2.244	11.54	1.0	1.136	1.415	1.872	7.287
Forma	a)	0.674	0.013	-1.64	6.053	0.125	0.630	0.706	0.755	0.845
	b)	0.575	0.028	-0.69	2.520	0.082	0.456	0.620	0.714	0.868
	c)	0.593	0.026	-0.85	2.829	0.101	0.496	0.639	0.720	0.846
	d)	0.584	0.081	0.301	1.780	0.021	0.342	0.500	1.0	1.0
	e)	0.493	0.041	0.068	2.002	0.016	0.324	0.480	0.675	1.0
Elongación	a)	0.922	0.007	-2.11	8.655	0.398	0.896	0.948	0.980	1.037
	b)	0.844	0.019	-1.02	3.343	0.324	0.762	0.888	0.953	1.051
	c)	0.858	0.017	-1.17	3.683	0.358	0.795	0.902	0.957	1.038
	d)	0.835	0.046	-0.03	1.936	0.165	0.660	0.797	1.128	1.128
	e)	0.773	0.030	-0.317	2.291	0.146	0.642	0.781	0.927	1.128

Debido al elevado número de depresiones pequeñas que hay en cada catálogo, los índices referidos a dimensiones de superficie (área) longitud (perímetro, longitud y ancho) han sido transformados logarítmicamente, lo que facilita la interpretación estadística de sus distribuciones individuales y comparadas al centrarse el sesgo por el reescalado de los valores más bajos. La **Tabla 1** recoge los estadísticos descriptivos, que se han calculado para la muestra de índices, obtenidos en cada catálogo. En cuanto al tamaño que poseen las depresiones, tanto en lo que se refiere al Log10 de sus dimensiones lineales (largo, ancho o perímetro), como de la extensión, los estadísticos y su representación sobre el diagrama de Box muestran que, en los catálogos de cuerpos de agua y otras publicaciones, se encuentran los objetos más pequeños, seguido del catálogo de depresiones, del de Wu (2016) y, por último, el de depresiones máximas de ArcGis.

La circularidad de los cuerpos de agua es muy baja para la gran mayoría (al menos el 75%) de los objetos en el catálogo, como ocurre para el catálogo de curvas 1:50000 (**Figura 9**, incisos a, b y c) en el que el 50% tiene una circularidad inferior a 1.05 (**Tabla 1**). Para los catálogos de máximas depresiones y de Wu (2016), el rango de valores de la circularidad aumenta considerablemente (**Figura 9**, incisos d y e) llegando a ser un orden de magnitud superior al resto de los catálogos. Los resultados obtenidos para la distribución del alargamiento (**Figura 9**) son semejantes a los de la circularidad. Sin embargo, las distribuciones del índice de forma siguen un comportamiento inverso a los anteriormente descritos.

La mayoría de los cuerpos de agua son relativamente ovalados, en general con valores comprendidos entre 0.63-0.75 y superiores, aunque estos últimos son menos frecuentes. La uniformidad en la distribución de la forma o elongación, cualquier valor es igualmente probable, es más acusada en el orden de las curvas topográficas 1:50000 que demarcan depresiones a las que se han extraído del MDE con los algoritmos de llenado, tal y como pone de manifiesto el aumento de la varianza de sus distribuciones.

Tras la evaluación de los comportamientos estadísticos de los índices que se usarán y la innecesaria transformación de los índices adimensionales, sólo de los relacionados con la longitud y la extensión, lo que ayuda al funcionamiento de las técnicas de clasificación jerárquica y k-medias que se emplearán, sobre éstos hay que identificar las variables que son discriminantes de la tipología de los objetos que hay en los catálogos. Para afrontar esta selección, se han utilizado las técnicas de agrupación jerárquica de variables con dos distancias para variables: coseno y correlación, y para agrupaciones: simple y completa, con las que, *a priori*, no es posible saber cuál es la que mejor discrimina (**Tabla 2**).

Figura 5. Diagramas de Box (cajas y bigotes) para cada uno de los índices morfométricos de los objetos inventariados en los diferentes catálogos CAT: a) cuerpos de agua, b) depresiones 1:50 000, c) otras 1:50 000, d) máximas depresiones ArcGis y e) Wu et al. (2016). En el eje x se observan las leyendas de izquierda a derecha: Log_{10} Área, Log_{10} Perímetro, Circularidad, Log_{10} Ancho, Log_{10} Largo, Forma, Alargamiento y Elongación.

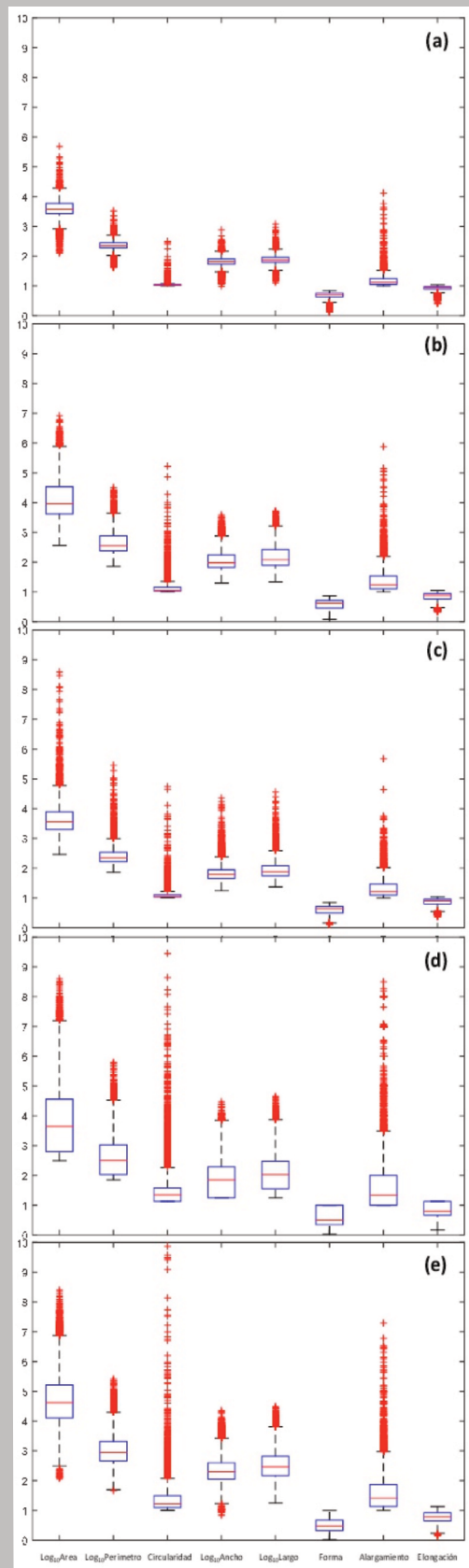
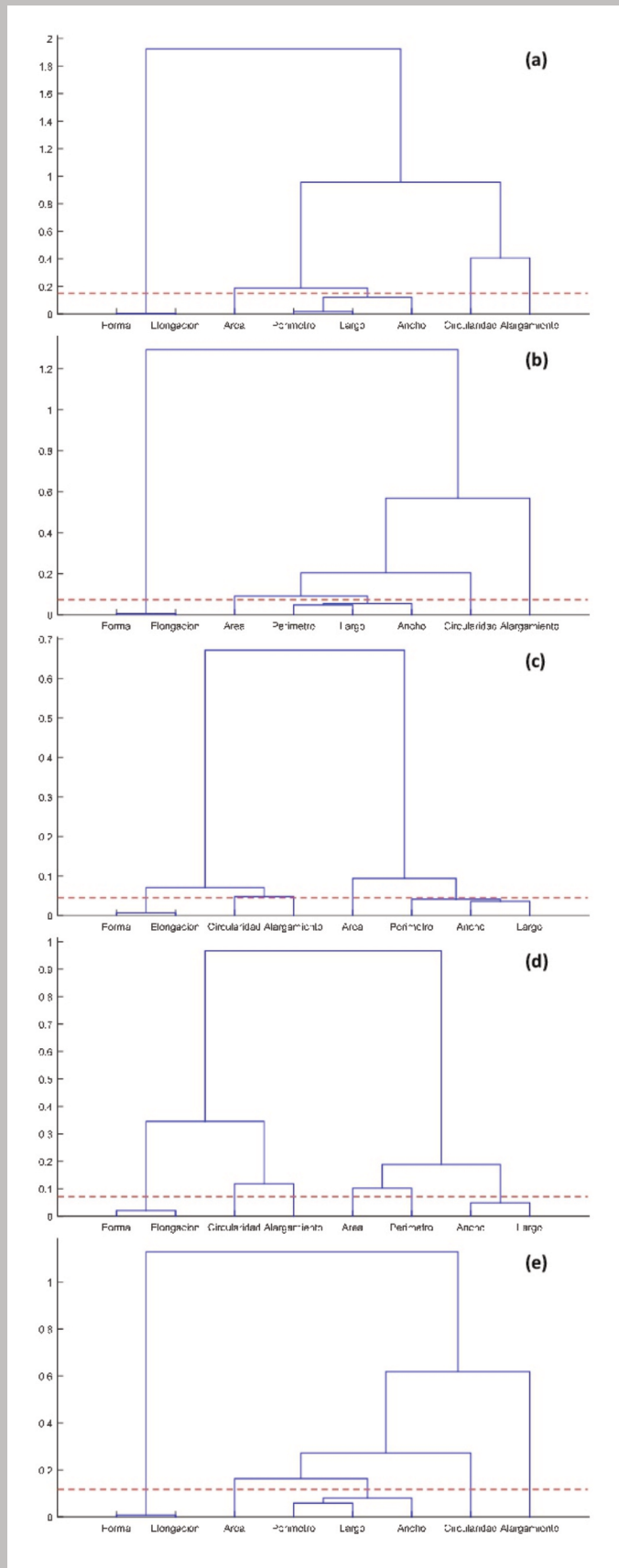


Tabla 2. Coeficientes de correlación cofenéticos obtenidos sobre los dendrogramas de las agrupaciones jerárquicas de los índices morfométricos de cada catálogo para los diferentes criterios de agrupación y distancias utilizadas. Valores máximos de correlación cofenético (*) cuya distancia y agrupación ha sido utilizada en el análisis clúster de logaritmos de índices morfométricos y con los que se ha establecido la selección de índices relevantes para la clasificación de individuos.

Análisis Clúster		Catálogo analizado				
Distancia	Agrupación	Cuerpos de Agua	Curvas 1:50000		Máximas depresiones ArcGis	Wu et al. (2016)
			Depresiones	Otras		
Coseno	Simple	0.8673	0.8844	0.9845*	0.9538	0.9013
	Completo	0.8777	0.8849	0.9845*	0.9539*	0.9064
Correlación	Simple	0.9405	0.9788*	0.9265	0.9476	0.9531*
	Completo	0.9411*	0.9783	0.9131	0.9412	0.9305
Distancia y agrupación para la que se ha obtenido (*). Análisis clúster tomando logaritmo en variables área, perímetro, largo y ancho		0.9214	0.9943	0.8341	0.8560	0.9845
Índices relevantes para agrupaciones K-medias		Log ₁₀ Área Log ₁₀ Perímetro Circularidad Forma Alargamiento	Log ₁₀ Área Log ₁₀ Perímetro Circularidad Forma Alargamiento	Log ₁₀ Área Log ₁₀ Perímetro Circularidad Forma Alargamiento	Log ₁₀ Área Log ₁₀ Perímetro log ₁₀ Largo Circularidad Forma Alargamiento	Log ₁₀ Área Log ₁₀ Perímetro Circularidad Forma Alargamiento

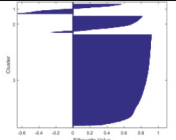
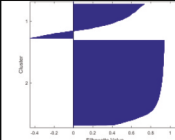
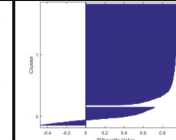
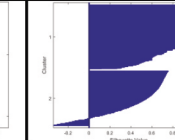
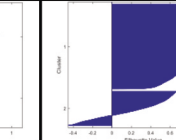
El estadístico utilizado para seleccionar la mejor discriminación en el proceso de agrupación jerárquica es del coeficiente de correlación cofenético, para el que su valor máximo se utiliza para identificar la pareja (distancia, agrupación) que mejor separa las variables. Para cada catálogo y pareja de posibilidades (distancia, agrupación) se ha obtenido el coeficiente de correlación cofenético, cuyo valor máximo (marcado con * en la **Tabla 2**) ha permitido obtener el dendrograma óptimo (**Figura 6**) con el que, para una distancia inferior a 0.1, se extraen los índices relevantes para ser utilizados en la agrupación de objetos con K-medias, que se indican en la última fila de la **Tabla 2**. Para todos los catálogos consultados, los índices que estadísticamente resultan recomendables utilizar son Log₁₀Área, Log₁₀Perímetro, Circularidad, Forma y Alargamiento, excepto para las máximas depresiones, a las que hay que añadir el Log₁₀Largo.

Figura 6. Dendrogramas obtenidos según la distancia y el criterio de agrupación de máximo coeficiente de correlación cofenético (* en la Tabla) para cada uno de los diferentes catálogos CAT: a) cuerpos de agua, b) depresiones 1:50 000, c) otras 1:50 000, d) máximas depresiones ArcGis y e) Wu et al. (2016).



En la determinación del número de clústeres en los que se van a agrupar los objetos de cada catálogo, *a priori* desconocido, han sido utilizados los cuatro estadísticos señalados en el apartado de metodología: de Calinski & Harabasz (1974), de Davies & Bouldin (1979), de cambio del espaciado y la suma de la silueta, para los que se ha tomado como número óptimo el correspondiente número de agrupaciones (**Tabla 3**) que da lugar a los valores máximos, los mínimos, la reducción del cambio del espaciado y el máximo, respectivamente, de estos estadísticos. El resultado idóneo es cuando todos los estadísticos proporcionan el mismo número óptimo de agrupaciones, a pesar de que consideren aspectos diferentes en la configuración de los clústeres y sus centroides. Sin embargo, no ocurre así al evaluar los estadísticos en los catálogos de cuerpos de agua y depresiones 1:50000. En estos casos, con algunas diferencias, se ha valorado si hay variación apreciable en el comportamiento de cada estadístico en función del número de clústeres óptimo y el resto, de no haberla, se tomará como número el que sugieren el resto de estadísticos. De hecho, el resultado conjunto no alcanza a ser un número de agrupaciones perfecta, ya que, como se observa en los diagramas de siluetas de cada catálogo (**Tabla 3**), para el número óptimo elegido hay valores de la silueta manifiestamente negativos que constatan su imperfección.

Tabla 3. Valores máximos de Calinski-Harabasz, mínimos de Davies-Bouldin, reducción del cambio del espaciado y máximo de la silueta para los índices morfométricos utilizados en la evaluación del número óptimo de agrupaciones a utilizar en la técnica de *k*-medias, según cada catálogo. Entre paréntesis, el número óptimo para cada estadístico en cada catálogo.

Estadísticos	Catálogo analizado				
	Cuerpos de Agua	Curvas 1:50000		Máximas depresiones ArcGis	Wu et al. (2016)
		Depresiones	Otras		
C-H máximo	1421.1 (4)	3565.8 (2)	2081.4 (2)	19335.2 (2)	6007.7 (2)
D-B mínimo	0.8492 (4)	1.0200 (2)	0.7447 (2)	0.8244 (2)	0.9447 (2)
C-S cambio	2.1353 (3)	2.1737 (3)	2.2594 (2)	2.2752 (2)	3.1445 (2)
V-S máximo	0.7136 (3)	0.7092 (2)	0.8060 (2)	0.6189 (2)	0.6254 (2)
Numero óptimo tomado de agrupaciones	3	2	2	2	2
Silueta de la agrupación según número óptimo					

Con el número de agrupaciones tomado como recomendable (indicado en la **Tabla 3**) se ha llevado a cabo la agrupación de los objetos por k-medias de acuerdo con una distancia euclídea óptima entre los centroides de los clústeres. Las agrupaciones obtenidas se han organizado por tamaños y considerando los valores referidos en la bibliografía para los índices promedio, se les ha asignado a una tipología de depresión kárstica. Así, para el catálogo de cuerpos de agua, los centroides de cada una de las tres agrupaciones han sido cotejadas con dolinas pequeñas, dolinas grandes y uvalas pequeñas (**Tabla 4**), de acuerdo con el orden de los tamaños de la primera coordenada \log_{10} Área del centroide, resultando ser dolinas de extensión media inferior a los 800 m². A continuación, la población de dolinas grandes con tamaños medios alrededor de los 4300 m², que se distinguen de las uvalas pequeñas para las que, en promedio, su circularidad es superior a 1.05 y el alargamiento mayor de 1.5. Las dos agrupaciones en las que se organiza el catálogo de curvas, depresiones y otras, de los mapas topográficos 1:50000, se distinguen por sus tamaños medios e índices de circularidad y alargamiento, considerando como dolinas grandes al conjunto de objetos que se organiza en torno del centroide de extensión media de 5700 m² y 3100 m², circularidad alrededor de 1.05 y alargamiento 1.2, respectivamente, para cada catálogo, y los otros centroides se asemejan a uvalas grandes, de mayor extensión, con un tamaño medio del orden de 0.1 km², de contorno algo más irregular y alargado que las dolinas, ya que su circularidad es del orden de 1.4-1.6 (obsérvense los valores de la **Tabla 4**) y con un alargamiento de 1.8.

El resultado para los catálogos de depresiones obtenidas mediante las técnicas de llenado sobre el MDE con el método de k-medias no fue concluyente, ya que no ha sido posible encuadrar las dos agrupaciones resultantes de cada catálogo en una tipología geomorfológica concreta. Sin embargo, utilizando la distribución jerárquica, resultado del método de Wu *et al.* (2016) y su correlación geomorfológica, ha sido posible estipular arbitrariamente una tipología a cada jerarquía. De acuerdo con el índice jerárquico asignado, aquellas depresiones que son de primer orden (nivel jerárquico $j=1$) no pueden ser uvalas, ya que por su definición en su interior no hay depresiones. Por ello, las de primer orden, o bien son dolinas, o bien son poljes de fondo muy llano en cuyo interior no se detectan otras depresiones. Órdenes superiores (niveles jerárquicos desde 2 a 7) corresponderán a uvalas o poljes en cuyo fondo se detectan una o varias depresiones anidadas. Con estas consideraciones, el catálogo de depresiones obtenido mediante el método de Wu *et al.* (2016) se subdivide en dos, uno que contiene los objetos de índice $j=1$ y otro que contiene el resto, cuyos índices están comprendidos entre 2 y 7. Se realiza sobre ambos de nuevo el estudio para establecer el número de clústeres óptimo, según los estadísticos de Calinski-Harabasz, de Davies-Bouldin, y la suma de la silueta, resultando cuatro para los objetos de primer orden y tres para el

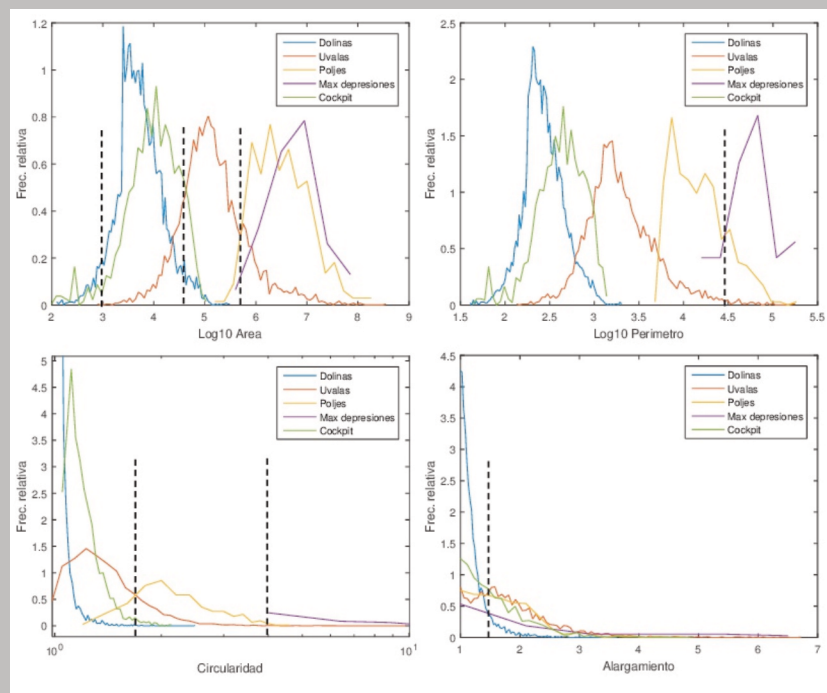
resto. El simple hecho de haber subdividido este catálogo según el nivel jerárquico ha permitido repartir (**Tabla 4**) las depresiones en pequeñas (principalmente dolinas y pequeños poljes) y en grandes (como uvalas y poljes). Ahora bien, cada subgrupo, a su vez, se ha repartido en pequeñas y grandes dolinas, pequeños poljes, y un cuarto grupo que, con el tamaño promedio de las dolinas, su circularidad es muy alta, con lo que son de perímetro irregular, pero con un índice de forma bajo de 0.5. Esta tipología, inicialmente no considerada, responde a lo que se denomina *cockpit kárstico*, frecuente en regiones tropicales de relieves abruptos. Las tres tipologías a las que se pueden asignar los clústeres resultantes, obtenidos sobre los niveles jerárquicos superiores a dos, son grandes uvalas, poljes y grandes depresiones, con tamaños medios de 0.2 km², 4.4 km² y 8.8 km², respectivamente, y todas ellas con valores de circularidad y alargamiento elevados.

Tabla 4. Coordenadas de los centroides de las agrupaciones obtenidas mediante el método de k-medias para los catálogos de: a) cuerpos de agua, b) depresiones 1:50000, c) otras 1:50000, d) Wu et al. (2016), subdividido en el conjunto de jerarquía de primer orden (j=1) y jerarquías restantes (j=2 a j=7) y e) obtenida mediante la aplicación de rangos umbral para las máximas depresiones de ArcGis.

Catálogo	Índices morfométricos relevantes	Tipología geomorfológica de depresión kárstica						
		Dolinas pequeñas	Dolinas grandes	Dolinas "cockpit"	Uvalas pequeñas	Uvalas grandes	Poljes	Gran depresión
Cuerpos de Agua	Área	789.3	4314.5		11905.2			
	Perímetro	105.1	240.1		471.3			
	Circularidad	1.059	1.031		1.237			
	Forma	0.658	0.703		0.421			
	Alargamiento	1.225	1.138		1.825			
Depresiones 1:50000	Área		5687.3			107734.1		
	Perímetro		282.7			1638.1		
	Circularidad		1.059			1.464		
	Forma		0.650			0.392		
	Alargamiento		1.247			1.805		
Otras 1:50000	Área		3112.7			124745.1		
	Perímetro		210.7			1952.8		
	Circularidad		1.068			1.634		
	Forma		0.634			0.357		
	Alargamiento		1.289			1.824		
Wu et al. (2016) (j=1)	Área	18302.5	219393.7	13439.9			223632.2	
	Perímetro	491.1	1714.8	489.4			2586.1	
	Circularidad	1.024	1.032	1.198			1.594	
	Forma	0.715	0.697	0.557			0.366	
	Alargamiento	1.118	1.134	1.478			1.925	
Wu et al. (2016) (J=2-7)	Área					195788.9	4400156.7	8810090.9
	Perímetro					2335.1	17233.3	69191.6
	Circularidad					1.524	2.390	6.933
	Forma					0.370	0.288	0.120
	Alargamiento					1.823	1.795	2.480
Máximas depresiones (según Tabla 5 de umbrales)	Área		21028.1	190919.5		626944.5	9484680.3	51938815.6
	Perímetro		536.6	873.9		2375.8	19348.3	128379.6
	Circularidad		1.046	1.223		1.407	2.373	5.326
	Forma		0.716	0.511		0.311	0.256	0.210
	Alargamiento		1.092	1.558		2.132	1.800	1.627

Una vez identificadas y asignadas las agrupaciones en los catálogos que sí han podido clasificarse con el método de k-medias, para la asignación de los objetos del catálogo de máximas depresiones depuradas obtenidos de ArcGis, se han establecido los valores umbral que tienen los índices para cada una de las tipologías geomorfológicas de depresiones kársticas. La determinación de estos valores umbral se basa en el rango de valores más probables extraídos de los histogramas obtenidos sobre cada uno de los índices morfométricos para el conjunto de dolinas, cockpit, uvalas, poljes y depresiones, sin incluir los objetos procedentes del catálogo de máximas depresiones obtenido con ArcGis que aún están sin clasificar. Antes de calcular estos histogramas, los conjuntos de cada tipología se han refinado para evitar la duplicidad de los objetos que incluyen. Después de eliminar los objetos duplicados se han obtenido los histogramas del \log_{10} Área, \log_{10} Perímetro y circularidad y alargamiento (**Figura 7**), con los que se definen los rangos de los índices morfométricos que figuran en la **Tabla 5**, de acuerdo con los valores umbral de cambio de función de distribución.

Figura 7. Histogramas de los índices morfométricos de tamaño (\log_{10} Área y \log_{10} Perímetro), circularidad y alargamiento para las tipologías geomorfológicas de depresiones kársticas, sobre los que se establecen los rangos de la **Tabla 5**.



Con estos rangos se han clasificado los objetos en el catálogo de máximas depresiones calculado con ArcGis, considerando en primer lugar aquellas grandes depresiones cuyo perímetro es superior a 31623 m (104.5 m) y la circularidad es mayor que 4, resultando que sus extensiones son algo mayor a un kilómetro cuadrado (**Tabla 4**) con una superficie promedio de más de 50 km². A continuación, de las restantes, se han extraído los poljes, tomando como umbrales un área mayor que 501190 m² (105.7 m²) y su circularidad es mayor que 1.68. El tamaño medio de los poljes identificados por ArcGis supera una superficie de 9 km², con un promedio de alargamiento de 1.8 y de forma de 0.256. Los tamaños establecidos para las uvalas están comprendidos entre los 31 623 m² (104.5 m²) y los 105.7 m², además de una circularidad mayor que 1.05 y un alargamiento mayor que 1.5. Excluidas las grandes depresiones y los poljes, del conjunto restante se han extraído las uvalas, que sobre el catálogo de máximas depresiones poseen un tamaño medio superior al medio kilómetro cuadrado (**Tabla 4**). Las dolinas identificadas se caracterizan por tener un tamaño inferior a los 25120 m² (104.4 m²) con una circularidad inferior a 1.05, por lo que en el catálogo de ArcGis se identifican con un tamaño medio de 21000 m². Finalmente, de las restantes, que no se encuadran entre las dolinas por tener una circularidad superior a 1.05, corresponden con depresiones del tamaño dolina, pero de contorno más irregular, por lo que serán depresiones tipo cockpit (**Tabla 5**) y que en el catálogo de ArcGis son depresiones de tamaño medio, un orden de magnitud superior al de las dolinas (**Tabla 4**), pero inferior al de las uvalas y con una circularidad y alargamiento relativamente altos para ser dolinas.

Tabla 5. Rangos de los índices morfométricos característicos para cada una de las tipologías. Las celdas sombreadas no aplican umbral de corte del índice para la tipología.

Índices morfométricos relevantes	Tipología geomorfológica de depresión kárstica				
	Dolinas	Dolinas "cockpit"	Uvalas	Poljes	Gran depresión
Área (m ²)	[10 ³ , 10 ^{4.5}]	[10 ³ , 10 ^{5.7}]	[10 ³ , 10 ^{5.7}]	> 10 ^{5.7}	
Perímetro (m)					> 10 ^{4.5}
Circularidad	< 1.05	> 1.05	> 1.05	> 1.68	> 4
Alargamiento		< 1.5	> 1.5		

Definidas las agrupaciones en el catálogo de máximas depresiones, éstas se han incorporado al inventario de cada tipología geomorfológica de depresión kárstica, unificando y suprimiendo las duplicidades, como se hizo con los catálogos anteriores, conformando los catálogos unificados de síntesis para dolinas, con un total de 6587 objetos, de 5176 depresiones tipo cockpit, para uvalas con 4428 cuerpos, 406 poljes y 89 grandes depresiones, lo cual amplía en gran medida los catálogos previos y publicados.

Los histogramas calculados para cada índice relacionado con el tamaño (**Figura 8**, incisos a y b) para estos nuevos catálogos reflejan claramente las diferencias en la distribución de áreas y perímetros para cada una de las tipologías. Las dolinas, con tamaños comprendidos entre 10-102.3 m y 102-105 m², se diferencian de las uvalas, con 102.3-104.5 m y 103.2- 107 m², en perímetro y área promedios, respectivamente, surgiendo entre ambas una tipología con modas en el perímetro de 102.5 m y de 104 m² en el área, la cual, aunque inicialmente no se había considerado como una tipología específica, ha surgido como una agrupación más en alguno de los catálogos obtenidos del análisis del MDE y con una correspondencia geomorfológica como depresiones tipo cockpit, propia de regiones tropicales como la del estudio.

Entre las distribuciones de los índices propios de la forma (**Figura 8**) de cada tipología, es posible reconocer un comportamiento semejante al de las funciones de distribución de tamaños, como ocurre con el logaritmo de la circularidad; sin embargo, el alargamiento, la forma y la elongación se comportan de manera totalmente distinta. En el caso de la forma y la elongación se observa cómo el sesgo de la función de distribución cambia, pasando de ser asimétrica positiva o hacia la derecha para las dolinas, a ser asimétrica negativa o hacia la izquierda para las grandes depresiones, en el tránsito de unas a otras, el sesgo de la distribución de probabilidad va variando de ser positivo a negativo a medida que el tamaño de la depresión aumenta. El comportamiento de la función de distribución del alargamiento posee ciertas características ligadas a una ley de potencia en su representación y logaritmo que pudieran estar relacionados con cierta invarianza al cambio de escala (Turcotte, 1992) en la propiedad del alargamiento. Esto tiene una implicación importante ya que, independientemente de la tipología de depresión que se trate, la ley de distribución del alargamiento es la misma para todas con pequeñas variaciones en la pendiente, en el rango de valores del alargamiento en el que se verifica esta invarianza.

Su localización geográfica (**Figura 9a**), junto con los cenotes reportados por la SEDUMA (2015) que, como se indicó en el apartado correspondiente, no han sido analizados por tratarse de puntos, pone de manifiesto que se encuentran estructuralmente condicionadas por la geometría semicircular perimetral del cráter de Chicxulub sobre las planicies con lomeríos marginales a la costa, por la conjunción del campo de fracturas del distrito fisiográfico de Chichén Itzá de planicies horizontales de altitudes entre los 10 y 20 m, y pequeñas elevaciones del litoral del Mioceno, además de tratarse de una región donde las lluvias son muy abundantes (1500 mm/a) y en la que la fuerte anomalía gravimétrica parece ejercer cierta influencia; así como en la región del borde suroeste de la Falla de Ticul, sobre la sierra del mismo nombre que constituye una serie de lomeríos campechanos altos, medios y bajos con algunas planicies kársticas seniles sobre calizas del Mioceno,

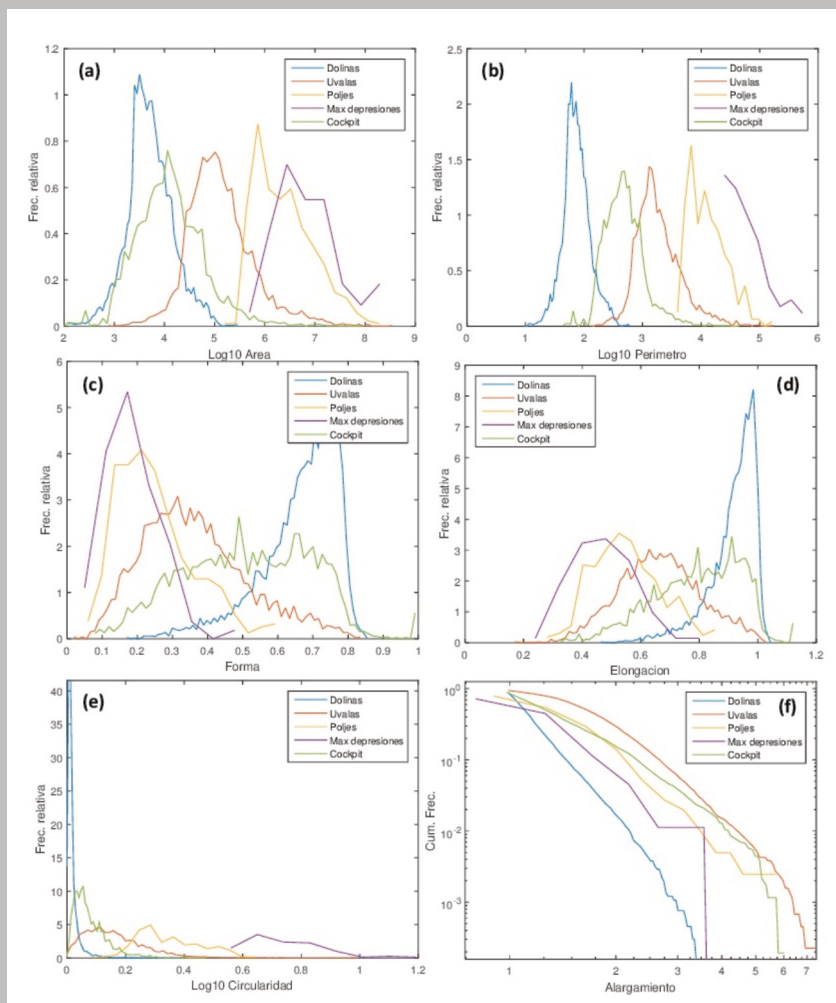


Figura 8. Histogramas de los índices morfométricos de tamaño (a) \log_{10} Área y b) \log_{10} Perímetro), c) Forma, d) Elongación, e) \log_{10} Circularidad y f) función de distribución acumulada del Alargamiento, para los inventarios de síntesis unificados de cada tipología geomorfológica de depresión kárstica sobre el estado de Yucatán.

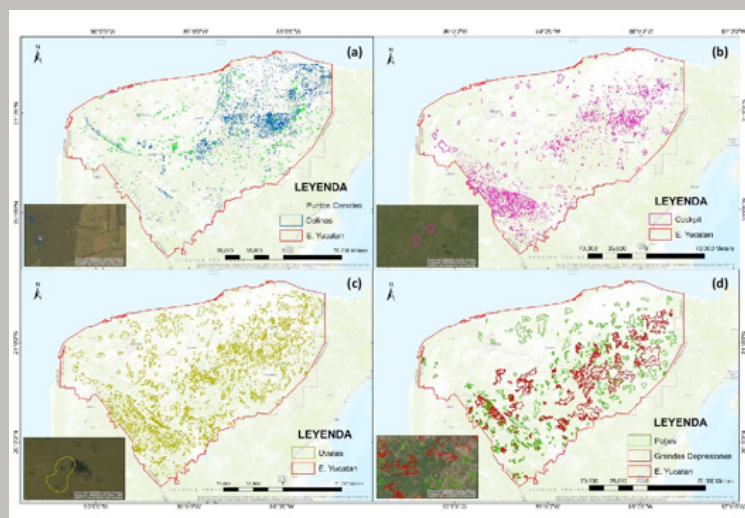
algunas inundables al ser una zona donde también se da una fuerte intensidad pluviométrica. El condicionamiento estructural de cráter de impacto desaparece en las 5176 pequeñas depresiones tipo cockpit identificadas, las que, tal y como expone la bibliografía consultada (Gutiérrez-Elorza, 2008; Huang *et al.*, 2014), su zona de ocurrencia (**Figura 9** inciso **b**), se concentra en la mitad oriental del estado de Yucatán fuera de la zona de planicies, allí donde el relieve se hace abrupto (compárese con el MDE de la **Figura 2** inciso **d**) formando lomeríos altos, accidentados con una gran densidad de mogotes y cerros de pequeño tamaño (áreas rojas en la **Figura 4** inciso **a**), intercalados con llanuras, entre las cuales puede encontrarse los cockpit, y mayoritariamente sobre la Sierra de Ticul, concentrándose en los límites occidentales de los distritos de Ticul y Tekax, con mogotes más o menos elevados, que bordean las dolinas y las encierran en una

región sometida a importantes precipitaciones. Las dolinas tipo cockpit de estas zonas se caracterizan morfométricamente por tener un tamaño medio de unos 250 m de largo por 185 m de ancho, lo que supone una extensión media de 0.13 km², un alargamiento promedio de 1.56, próximo al límite de 1.5, y circularidad de 1.21 por su marcado contorno irregular, siendo la más pequeña del inventario una de 115 m² (unos 9 m x 17 m).

Los 4428 objetos designados como uvalas, es decir, depresiones formadas por la coalescencia de dos o más dolinas, se describen morfométricamente como hundimientos de tamaño medio del orden de 900000 m², de contorno irregular no circular, con circularidad de 1.52 y alargamiento 1.9. Su distribución en la superficie del estado (**Figura 9** inciso c) parece estar muy marcada por la orografía del terreno y el ambiente geomorfológico de características tectono-kársticas del sur de Tekax, ya que es mucho más dispersa que las dolinas sobre la planicie; sin embargo, se hace mucho más uniforme por las zonas de llanuras onduladas con hondonadas que se encuentran en el borde oriental del estado, disminuyendo su densidad en las llanuras con cierta propensión a la inundabilidad o pseudopalustres próximas a este borde.

Las depresiones de mayor dimensión, el conjunto de poljes y grandes depresiones, se distinguen perceptiblemente de las anteriores por su extensión (**Figura 9** inciso d). Se distribuyen predominantemente sobre las zonas de llanuras onduladas con hondonadas y lomeríos bajos del centro y mitad oriental del estado, disminuyendo en las llanuras inundables o pseudopalustres del sur de la Sierrita de Ticul y hasta el borde meridional del estado en el que se topa con la llanura kárstica rocosa quintanarroense de bajos inundables. Los 406 poljes poseen un tamaño en torno a los 6310 m² y 794330 m², las 89 mayores depresiones superan los 106.5 m², entre todas cubren una extensión total de 3281 km², es decir, sólo las grandes depresiones constituyen algo más del 8% de la extensión del territorio del estado de Yucatán.

Figura 9. Distribución geográfica sobre el estado de Yucatán de los objetos asociados a cada una de las diferentes tipologías geomorfológicas tras la unificación y síntesis: a) dolinas y cenotes, b) depresiones tipo cockpit, c) uvalas y d) poljes y depresiones de gran extensión.



Reflexiones finales

La karstogénesis de formas exokársticas en la península de Yucatán es un proceso que da lugar a hondonadas o huecos con un amplio rango de tamaños, desde dolinas hasta grandes depresiones, fuertemente condicionadas a las características litológicas, estructurales e hidrogeológicas del terreno calizo y, además, por la distribución de los agentes climáticos, lo que se traduce en una distribución espacial irregular, reflejando, incluso visualmente en algunos casos, la predominancia de un factor u otro (p.e. en el “anillo de cenotes” o en la Sierrita de Ticul). Además, se trata de un proceso dinámico activo, para el que su evolución en el tiempo, lenta en algunos fenómenos (p.e. disolución, precipitación) y rápida en otros (p.e. el colapso del terreno adelgazado sobre una oquedad), limita la vigencia del catálogo geomorfológico. Este hecho, es particularmente relevante cuando se catalogan formaciones exokársticas en las que la actividad humana puede tener un importante efecto perturbador.

La validez de las técnicas semiautomáticas de clasificación se encuentra seriamente comprometida si la calidad de los catálogos utilizados no es la apropiada. La incorporación de errores en un catálogo o el desconocimiento del proceso de inventariado implica que, previo a cualquier análisis, haya que evaluar su contenido, depurándolo si es necesario mediante un contraste frente a otros catálogos u otras fuentes de información que lo validen. Así como los catálogos de cuerpos de agua y el jerárquico de Wu *et al.* (2016) se han considerado como válidos, los catálogos derivados de las curvas topográficas 1:50000 han tenido que ser depurados para la supresión de curvas que estaban abiertas, encerraban mogotes o eran erróneas. Por otro lado, la falta de completitud o el exceso de elementos de unas determinadas características pueden perturbar el reconocimiento de tipologías de tal forma que hagan inviable la clasificación, al sesgar la importancia, y por lo tanto la distribución, de los parámetros que se utilicen para discriminar las agrupaciones. Por ello, el catálogo de máximas depresiones obtenido con el algoritmo de llenado de ArcGis ha sido depurado antes de su análisis, suprimiendo las depresiones de tamaño inferior a 103 m² o 1 m de profundidad, al encontrarse en el límite de la detectabilidad para la precisión del MDE utilizado. El catálogo resultante del algoritmo de llenado jerárquico de Wu *et al.* (2016), utilizando los mismos parámetros de tamaño y profundidad, se ha subdividido teniendo en cuenta el significado geomorfológico de los niveles jerárquicos resultantes. Según lo recomendado por Li *et al.* (2011), las condiciones del suelo y del clima de un lugar, el proceso de interés y el alcance del estudio deben ser tomados en cuenta al tomar la decisión de seleccionar los umbrales apropiados de área y profundidad de las depresiones a estudiar. Aunque el estudio aquí realizado sólo se centró en las depresiones mayores que 1000 m², el método que se ha utilizado para la clasificación de las

poblaciones podría adaptarse fácilmente para identificar depresiones más pequeñas cuando se disponga de MDE más precisos y exactos.

Las técnicas de clasificación utilizadas, tanto la jerárquica como la basada en k-medias, han resultado ser eficientes a la hora de establecer las variables relevantes que describen las poblaciones y las agrupaciones de los individuos de cada una de éstas. Del enorme catálogo de índices morfométricos que se detallan para depresiones (Bondesan *et al.*, 1992), han bastado cinco índices: área, perímetro, circularidad, forma y alargamiento, para hacer una discriminación válida de los objetos y agruparlos en dolinas, uvalas, poljes y grandes depresiones, además de poner de manifiesto la existencia de otra agrupación, las dolinas tipo cockpit, no contemplada inicialmente en el catálogo de tipologías de depresiones kársticas, y que ha surgido como otra agrupación presente en el territorio con notabilidad geomorfológica. Sin embargo, no han sido capaces de obtener un resultado adecuado para el catálogo de máximas depresiones al contener un elevado número de objetos pequeños. En este sentido, la bibliografía presenta otras técnicas de reconocimiento de patrones más sofisticadas y robustas que pudieran ofrecer mejores resultados y que serán objeto de futuros estudios.

Los parámetros morfométricos medidos para depresiones en diferentes paisajes kársticos karst indican que no hay una distribución de tamaño asintótica continua; por lo tanto, es posible reconocer diferentes subpoblaciones. Tal como indica Sustersic (1994), las dolinas no son tan regulares como muchos métodos morfométricos simples suponen, ya que su factor de forma se extiende hasta valores de 0.2. Algunas de estas irregularidades probablemente deben su irregularidad al terreno abrupto o montañoso en el que se desarrolla (Sierrita de Ticul o altiplano de Chichén Itzá), otras al mayor dinamismo del conjunto en su evolución que no permite que la depresión consiga una forma regular.

La desigual distribución geográfica obtenida muestra que los factores que la condicionan afectan de forma distinta según sea la tipología de la depresión kárstica en el estado de Yucatán. La ubicación de dolinas y cenotes presenta un condicionamiento fundamentalmente estructural según la geología, tectónica e hidrogeología del subsuelo, ligado a las zonas de debilidad litoestructural o disolución preferencial sobre fallas, fracturas, diaclasas o de circulación hidrogeotérmica ligadas a la dinámica de la haloclina. Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño de la depresión kárstica, parece descubrirse más restringida por la estructura del paisaje, estando su fisiografía asociada a llanuras de pequeña o media elevación, hondonadas, mogotes bajos y cerros relativamente dispersos, entre los cuales se encuentran las depresiones. Es clara esta relación geológica o fisiográfica con las depresiones de menor y mayor tamaño, respectivamente, lo que sí queda puesto


de manifiesto, frente a trabajos previos, es la enorme extensión de terreno endorreico que hay en el estado de Yucatán.

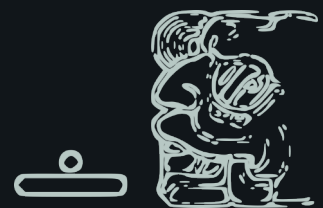
Los resultados obtenidos pueden servir de orientación a las políticas de conservación de los recursos hidrogeológicos, más en una dirección extensiva sobre la importancia de preservar el terreno en su conjunto, que un control puntual de los cenotes, aguadas o dolinas próximas a concentraciones urbanas que se encuentran sobre los acuíferos, habida cuenta de que la amplia superficie endorreica hace que sea muy probable que cualquier foco de contaminación en superficie alcance el agua del acuífero.

Agradecimientos

Los trabajos de investigación expuestos en este trabajo se encuadran dentro del *Desarrollo metodológico para la caracterización del impacto del cambio climático en terrenos kársticos: condicionantes geológicos, vulnerabilidad y efectos en los recursos hídricos y en el medio ambiente*, proyecto de I+D+I en el marco del plan estatal de investigación científica y técnica y de innovación 2013-2016 de España. Asimismo, es producto del Convenio Marco firmado entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) para estudios conjuntos entre México y España.



 *1Cenote Papakal, ubicado en las cercanías del poblado de Eknakán, Yucatán. Cuenta con dos desarrollos de cueva. Buzo: Silvia Hernández. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Capítulo 6

Los ecosistemas acuáticos de la península de Yucatán

Jorge A. Herrera Silveira

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV) Mérida-
Instituto Politécnico Nacional. Unidad Funcional y Laboratorio del Trópico

Introducción

Los ecosistemas acuáticos de la península de Yucatán (PY) contribuyen a la biodiversidad de las zonas tropicales. La estructura y función de estos ecosistemas, así como sus servicios ambientales asociados son el resultado de la interacción desarrollada a lo largo del tiempo entre el clima y la geomorfología en este ambiente kárstico. Sus peculiaridades han sido objeto de estudio por investigadores de otras nacionalidades y orígenes, atraídos por las condiciones particulares que ofrecen los ecosistemas acuáticos de Yucatán.

Entre las diferentes singularidades y características de los ecosistemas acuáticos de la PY que los hace ideales para la experimentación, ya que pueden ser considerados como laboratorios naturales, destacan los siguientes: a) todos estos ecosistemas están influenciados sólo por aguas subterráneas cuyos movimientos verticales y horizontales tienen dependencia con las características del clima; b) existe un gradiente geográfico de norte a sur que hace variar sus condiciones climáticas desde aquellas más semiáridas a condiciones de humedad, lo que les confiere un carácter singular y apropiado para el estudio de las condiciones a corto, mediano y largo plazo dentro del contexto del cambio climático, y c) la historia geológica, profundidad del agua subterránea respecto a la superficie y los tipos de uso del suelo son diferentes del centro de la península a la costa. Todas estas características ofrecen posibilidades significativas mediante el estudio del gradiente tierra-costa para investigar las interacciones entre los tipos de ecosistemas acuáticos de la PY, y la influencia que las perturbaciones (naturales y antropogénicas) tienen sobre su estructura y función.

Existen diferentes autores nacionales e internacionales que sugieren un enfoque ecosistémico de cuenca que permitiría el análisis correcto de la conectividad hidrológica en un marco temporal de largo plazo. Este enfoque debe permitir, además, abordar los procesos relacionados con la salud de los ecosistemas acuáticos y maximizar su capacidad de resiliencia y resistencia a las perturbaciones. Este tipo de aproximaciones sólo se pueden llevar a cabo de forma correcta mediante el uso de modelos de investigación inter, multi y transdisciplinarios. Aunque en la actualidad sigue en proceso de generación de conocimiento en cuanto al estado de los ecosistemas acuáticos de la PY, el marco conceptual que ha dominado en los diferentes estudios ha sido parcial, abordando un tipo o una característica de cada ecosistema (Iliffe, 1992; Perry *et al.*, 1995; Smart *et al.*, 2006). Esto, lamentablemente, puede ofrecer una visión parcial e incluso sesgada del estado ambiental de estos ecosistemas. En los ecosistemas acuáticos de la PY, los flujos verticales y horizontales del ciclo del agua son igualmente importantes en su funcionamiento y en los servicios ambientales que ofrecen desde la época prehispánica

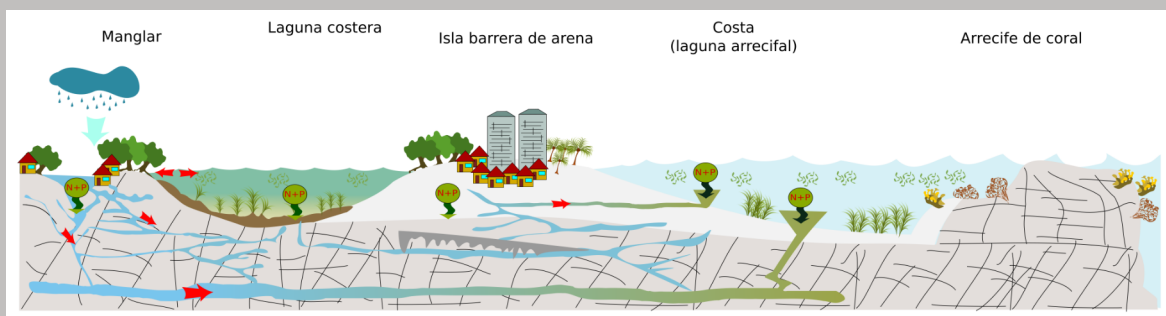
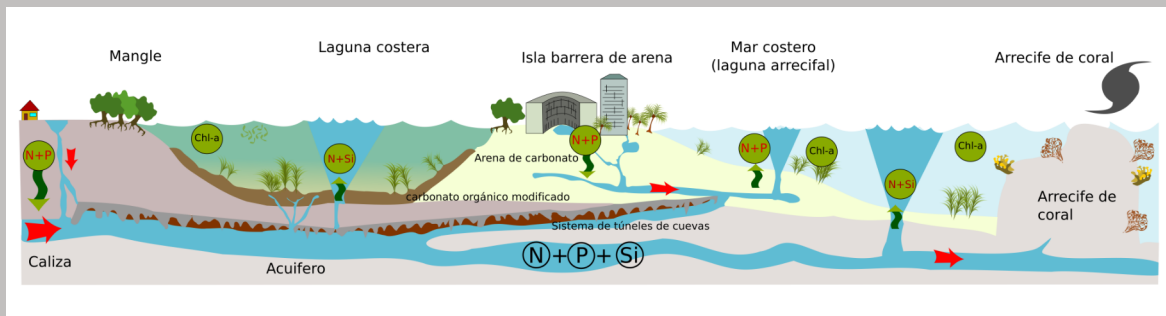
hasta nuestros días (Hodell *et al.*, 1995; Steinich y Marin, 1997; Brenner *et al.*, 2003). Los flujos verticales entre la atmósfera y el subsuelo están controlados por el carácter kárstico dominante.

De esta forma, la capa de suelo delgada y altamente permeable permite que el agua de lluvia viaje rápidamente por infiltración entre las rocas al subsuelo, mientras que el flujo vertical de la tierra a la atmósfera también es relativamente rápido, como consecuencia de la alta evaporación que se produce en la zona.

Por otra parte, los flujos de agua horizontales se mueven en diferentes direcciones a través del subsuelo de la península y siempre tienen como destino final la costa, presentándose descargas tanto en forma difusa a través de fracturas de la roca o puntuales a través de manantiales submarinos (**Figura 1**) (Herrera-Silveira, 1994; Bauer-Gottwein *et al.*, 2011).



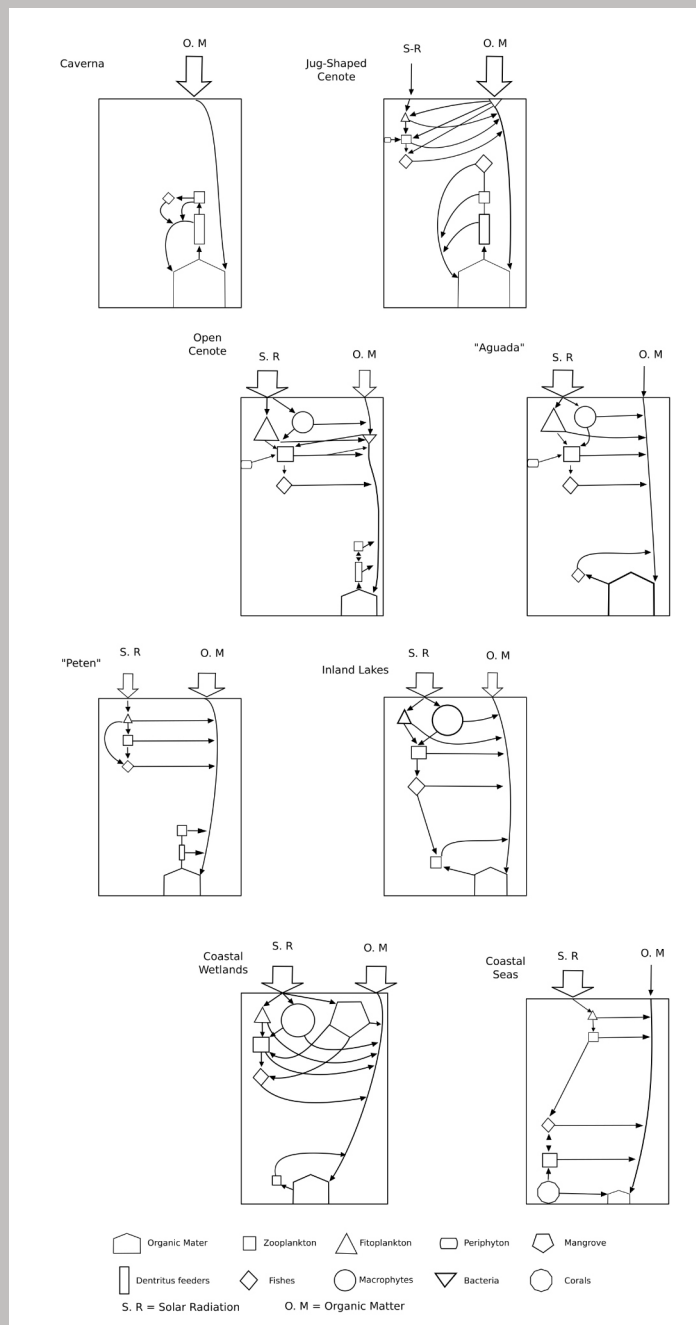
Figura 1. Flujos verticales y horizontales del ciclo de agua en los ecosistemas acuáticos de la PY. Bauer-Gottwein *et al.*, 2011.



Ambos tipos de flujos de agua en un medio kárstico como el de la PY desencadenan diferentes reacciones geoquímicas, teniendo como resultado, entre otros, los procesos de disolución y precipitación de la roca calcárea (Escolero *et al.*, 2007; Perry *et al.*, 2009; Pérez-Ceballos *et al.*, 2012). Esto favorece el desarrollo de un paisaje heterogéneo que se refleja en un gradiente de ecosistemas acuáticos de distinta índole.

Estos ecosistemas acuáticos se pueden clasificar en función de características geomorfológicas, que además tienen funcionamientos diferentes (**Figura 2**), los más significativos de estos ecosistemas acuáticos son:

Figura 2. Diagramas conceptuales del funcionamiento de los ecosistemas acuáticos de la PY.



Cavernas

Son sistemas subterráneos compuestos de pasajes y piscinas de agua acumulada en depresiones, alimentadas por agua de lluvia e infiltraciones verticales que, con frecuencia, forman estalactitas y estalagmitas. Su condición prácticamente cerrada y en ausencia de luz impide el desarrollo de los organismos fotosintéticos, la estructura trófica se basa en materia orgánica detrítica alóctona que accede verticalmente por grietas u otros organismos (*e.g.*, murciélagos) (Gold, 1991) (**Figura 2**). Se ha observado que los animales que viven en este entorno muestran adaptaciones evolutivas que incluyen la falta de órganos visuales y muy bajas tasas de crecimiento demográfico. La calidad del agua y las comunidades biológicas son sensibles incluso a muy bajas perturbaciones naturales y antropogénicas (Ilife, 1992).

Cenotes en forma de "cántaro"

Éstos son cuerpos de agua subterráneos comunicados con la superficie a través de una pequeña abertura que limita la luz. Por debajo de esta entrada, las paredes se expanden gradualmente tanto por encima como por debajo del nivel del agua. La radiación solar en estos ecosistemas es limitada a la superficie del medio acuático y sólo a una parte de ella, dependiendo de ciclo diurno. Sólo una fracción de la estructura trófica se sostiene por organismos fotosintéticos (clorofila-a está comprendido entre 0.26 y 3.33 mg m⁻³) (Herrera-Silveira *et al.*, 2000), de aguas abiertas o incrustados en las paredes de las rocas, ya que la mayoría depende de materia orgánica alóctona y del reciclaje que se produce entre la columna de agua y los sedimentos (**Figura 2**).

Cenotes abiertos

Este grupo incluye ecosistemas acuáticos en diferentes etapas de desarrollo geomorfológico. Algunos de ellos contienen agua profunda (>10 m) rodeada por altas paredes verticales, mientras que otros tienen aguas someras (<5 m). Los que tienen unos valores relativamente altos de la relación volumen/superficie de agua llegan a presentar vegetación de macrófitos en sus alrededores (entre un 10 y 50% de su superficie está cubierta por especies como *Cladium sp.*, *Typha sp.*, *Ruppia sp.*, *Nymphaea sp.*, *Eichhornia sp.*) y una baja proporción de fitoplancton (<1 mg m⁻³ de clorofila-a) (Comín *et al.*, 1996; Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Por el contrario, en el otro extremo están los ecosistemas que presentan valores relativamente bajos en las relaciones superficie/volumen caracterizados por dolinas, resultado del colapso de la bóveda superior a consecuencia de un proceso de disolución del karst, asociados con el flujo vertical de agua. Este tipo de ecosistema está expuesto a una alta radiación solar y la estructura trófica se basa en

productores primarios planctónicos. Sin embargo, estos ecosistemas pueden además recibir aportes importantes de materia orgánica alóctona por escorrentía vertical al estar asociados a la vegetación del paisaje circundante (**Figura 2**). En algunos de estos ecosistemas se puede formar una termoclina y una picnoclina que puede, en ocasiones, ser permanente, favoreciendo aguas profundas anóxicas que mantienen secuestradas ciertas cantidades de carbono orgánico, de forma similar a como se producen las condiciones en mares profundos. Estas singularidades hacen a estos ecosistemas importantes por su papel en la posible mitigación del cambio climático. Existe un número significativo y diferentes ecosistemas acuáticos con características de transición entre los que se han descrito anteriormente.

Aguadas

Estos ecosistemas abiertos a la atmósfera están formados por depresiones poco profundas (<2 m) que no están conectados directamente a las aguas subterráneas. El agua de estos ecosistemas proviene directamente del agua de lluvia, por lo que su volumen cambia estacionalmente. Muchos de estos cuerpos de agua fueron utilizados por los habitantes de sus alrededores en la época prehispánica para abastecerse de agua y cubrir sus principales necesidades domésticas. La estructura trófica de las aguadas se basa en poblaciones planctónicas dominadas por cianobacterias (*Microcystis sp.*) y las algas verdes (*Scenedesmus sp.*, *Dichtyosphaerium sp.*) y en la materia orgánica de macrófitos emergentes como *Typha sp.*, *Nymphaea sp.*, *Eichhornia sp.*, que pueden llegar a cubrir más del 50% de la superficie del agua (Herrera-Silveira *et al.*, 2002).

Petenes

Los petenes son ecosistemas asociados a descargas puntuales de agua subterránea (manantial) cercanos a la costa (**Figuras 2 y 3**). Se caracterizan porque la vegetación arbórea alta (<10 m) se agrupa alrededor del manantial, formando "islas" que resaltan entre amplias zonas inundables de vegetación herbácea o arbustiva (<2 m). Los petenes son particularmente abundantes en la porción centro-oriental de Quintana Roo y en el noroeste del estado de Campeche (Barrera, 1982; Rico-Gray, 1982).

Por localizarse cercanos a la costa se observa mezcla de agua salobre y agua dulce, por lo que la presencia de especies de manglar es común. En estos ecosistemas, la conectividad entre el agua subterránea y de mar se refleja en los cambios temporales y espaciales de la salinidad del agua como resultado de la interacción entre el acuífero continental y las fuerzas de marea y las olas. En algunos petenes, los aportes de aguas subterráneas están restringidos debido a la acumulación de materia

orgánica asociada a la alta productividad de la vegetación circundante. Los almacenes de carbono en los petenes son los más altos registrados para cualquier tipo de vegetación en México (1100 Mg C/ha \pm 200) (Herrera-Silveira *et al.*, 2016). Esta condición los coloca en un sitio privilegiado para contribuir en la mitigación del cambio climático, por lo que su conservación debe ser una prioridad a escala regional y nacional. Es probable que la hidrología, en especial los nutrientes (principalmente nitratos) presentes en las aguas subterráneas y el tiempo de inundación (López-Portillo *et al.*, 1989; Herrera-Silveira *et al.*, 2000; Caamal-Sosa *et al.*, 2012) favorezcan la productividad y la acumulación de materia orgánica, respectivamente, en estos ecosistemas. Las especies de plantas acuáticas y terrestres más comunes son: *Rhizophora mangle*, *Laguncularia racemosa*, *Manilkara zapota*, *Ficus sp.*, *Acrostichum sp.*, *Sabal sp.* y *Bravaisia sp.* (Tun-Dzul *et al.*, 2010).

Lagos interiores

Los lagos interiores se encuentran en la región del sudeste de la península de Yucatán. Su larga y estrecha morfometría sugiere que sus cuencas tienen un origen tectónico. El agua, por lo general, contiene mayor cantidad de sólidos disueltos totales (3000 a 6600 mg l⁻¹) que otros ecosistemas acuáticos continentales en Yucatán (275-600 mg l⁻¹), debido a la influencia de los depósitos de sulfato que son relativamente ricos en la zona (Comín, 1996; Perry *et al.*, 2009). Algunos de estos lagos son cerrados (endorreicos) y las fluctuaciones de nivel de agua a largo plazo, registradas en sus sedimentos, reflejan los cambios climáticos en diferentes escalas de tiempo (Hodell *et al.*, 1995). En sus alrededores es común la vegetación de macrófitos emergentes como *Phragmites sp.*, *Paspalum sp.*, *Cladium sp.*, *Eleocharis sp.* y *Typha sp.* (Flores y Espejel, 1994). Estos ecosistemas son relativamente someros (<3 m), observándose vegetación sumergida como *Chara sp.* y *Ruppia sp.*, siendo éstos los productores primarios dominantes de la estructura trófica. Estacionalmente y en sitios que sufren la acción antropogénica, la producción planctónica podría desempeñar un papel importante en las cadenas tróficas (**Figura 2**).

Humedales costeros

Existen diferentes tipos de ecosistemas (lagunas costeras, ciénegas, manglares, pastos marinos) que se pueden incluir en el grupo de ecosistemas descritos en este apartado (**Figuras 1 y 3**). La geomorfología e hidrología, en particular el hidroperiodo, así como la intensidad y frecuencia de la mezcla de agua dulce y de mar son los factores principales que determinan las características ecológicas de estos ecosistemas (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009; Morales-Ojeda *et al.*, 2010) (**Figura 4**). Su productividad se asocia principalmente con los

aportes de nutrientes provenientes de las descargas de agua subterránea. En un transecto tierra-mar o agua dulce-agua marina, los productores primarios varían de macrófitos emergentes (*Typha sp.*, *Phragmites sp.*), a manglares (*Laguncularia racemosa*, *Avicennia germinans*, *Rhizophora mangle*), a vegetación acuática sumergida (*Chara sp.*, *Ruppia sp.*, *Halodule wrightii*, *Thalassia testudinum*) y en la columna de agua a fitoplancton dominado por diatomeas (Troccoli *et al.*, 2004; Álvarez-Góngora & Herrera-Silveira, 2006).

Estos ecosistemas permiten una alta diversidad de servicios ambientales, por lo que su conservación y restauración deben ser acciones para dar soporte a las políticas de desarrollo sustentable, reducción de riesgos, fortalecer la resiliencia costera y mitigar los efectos del cambio climático. Los humedales costeros de la PY son de reconocido interés internacional por formar parte de corredores biológicos importantes para aves acuáticas y tortugas, entre otros organismos. Sin embargo, han sufrido diferentes impactos, tanto por perturbaciones naturales (huracanes) como antropogénicas (*e.g.*, cambio de uso del suelo, deforestación, contaminación) poniendo en riesgo el funcionamiento del ecosistema y, por tanto, de la fauna asociada con él, como la fauna migratoria.

Aguas costeras

Las aguas costeras de menos de 10 m de profundidad, tanto del Mar Caribe como del Golfo de México, también forman parte de los ecosistemas acuáticos de la PY. La influencia de las aguas subterráneas se ha registrado hasta varios centenares de metros. Las mismas han podido ser identificadas como las causantes de impactos negativos en el funcionamiento del ecosistema (**Figuras 1 y 3**) (Mutchler *et al.*, 2007). Las mareas rojas, las concentraciones de algunos contaminantes en el agua, sedimentos y tejidos de organismos acuáticos son indicadores de esta conectividad e impactos negativos (Pech *et al.*, 2009; Hernández-Terrones *et al.*, 2011; Metcalfe *et al.*, 2011; Merino-Virgilio *et al.*, 2013). Los productores primarios en estas aguas son de alta diversidad, ya que tanto el fitoplancton como la vegetación sumergida (macroalgas y pastos marinos) tienen contribuciones importantes en la estructura trófica de estos ecosistemas acuáticos. Las diferencias que existen entre las aguas costeras del Caribe y el Golfo de México están relacionadas en que las de este último son más turbias y ricas en nutrientes comparadas con el primero (Troccoli *et al.*, 2004; Herrera-Silveira y Morales-Ojeda, 2009). Esta región de la PY soporta una gran industria turística y pesquera, ambas actividades dependientes de la salud de los ecosistemas acuáticos. Especial atención se debe invertir al estudio del agua subterránea que descarga en el Caribe, fundamentalmente debido a la sensibilidad de los corales a la eutrofización. Diversos estudios e informes sugieren un cambio de fase en la biodiversidad de los arrecifes de coral del Caribe, asociados con la sobrepesca y a las descargas de agua subterránea con concentraciones significativas de diversos contaminantes (Arias-González *et al.*, 2011).

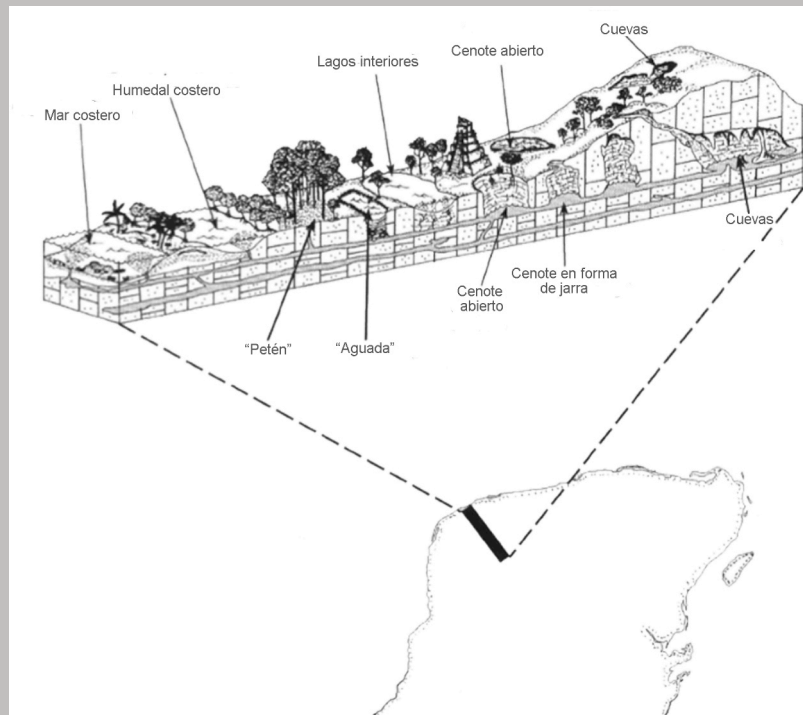


Figura 3. Representación conceptual de la sección transversal tierra-mar de la PY indicando los diferentes ecosistemas acuáticos.

Es evidente que los ecosistemas acuáticos de la PY no están sometidos a estrés por la cantidad de agua. Sin embargo, y debido a que las variaciones en la recarga del acuífero por precipitación están relacionadas con la estacionalidad de las lluvias, los cambios del clima pronosticados deben ser analizados por la dependencia de la estructura y funcionamiento de estos ecosistemas con el ciclo del agua en esta región. Por otro lado, las aguas residuales sin tratamiento de las áreas urbanas y la industria agropecuaria que son vertidas al subsuelo y llegan al acuífero, han reducido la calidad del agua y puesto en riesgo la salud de estos ecosistemas acuáticos.

Los ecosistemas acuáticos son indicadores útiles del grado de la posible degradación ambiental en la PY y su estudio ha proporcionado resultados y obtenido directrices para el manejo sustentable del recurso agua de esta región del país. Para lograr lo anterior, se debe preservar y mejorar la salud de los ecosistemas acuáticos de la PY, requiriéndose poner en marcha acciones de diversa índole que han sido sugeridas en los programas de ordenamiento territorial y que consideran las características ambientales y climáticas presentes y futuras. Si esto no sucede en un corto periodo de tiempo y las tendencias actuales de uso del suelo y del agua continúan, existirá un alto riesgo de extender espacialmente el impacto negativo ya registrado en algunos de los ecosistemas acuáticos, reduciendo sus servicios ambientales asociados y, por ende, las actividades productivas relacionadas, debilitando, a su vez, las estructuras socioeconómicas de esta región de México.

Debido a la variabilidad de condiciones que presentan los ecosistemas acuáticos de la PY, éstos pueden funcionar como indicadores ecosistémicos de la salud de toda la península. Algunos retos en el futuro próximo para lograr un desarrollo sostenible que beneficie a la población humana y a los ecosistemas se relacionan con: i) mejorar la calidad de los servicios públicos y privados de distribución de agua potable y el tratamiento de aguas residuales, ii) re-equilibrar y optimizar los usos del suelo, así como preservar mayores superficies de áreas naturales, y iii) establecer planes de manejo y de monitoreo de ecosistemas acuáticos seleccionados por su integridad ecológica, relevancia cultural y grado de perturbación, como estrategia de vigilancia de la salud de la PY, y de mitigación de los efectos de perturbaciones naturales y antropogénicas.

La PY es una región con alto potencial de crecimiento económico basado en sus condiciones ecológicas; sin embargo, los signos de daño al medio ambiente son claramente visibles en el paisaje, como ejemplo tenemos a los ecosistemas acuáticos. El estudio y manejo de estos ambientes debe realizarse bajo un marco conceptual ecosistémico a largo plazo y a escalas espaciales que consideren la conectividad e interdependencia de los ecosistemas acuáticos de la península.

El carbono de los ecosistemas acuáticos: una respuesta al cambio climático

Para que la naturaleza funcione correctamente debe existir equilibrio entre la abundancia de los elementos químicos en sus almacenes y la velocidad en la que se transfieren y transforman al pasar de un almacén a otro. Esto es un balance entre los procesos termodinámicos y cinéticos. Sin embargo, el hombre, de forma intencionada o no, ha modificado, tanto los almacenes, como las velocidades de circulación de los elementos. En el caso del almacén de carbono en la atmósfera, éste ha aumentado por actividades humanas como la deforestación, el cambio de uso del suelo, la quema de combustibles fósiles, las prácticas agrícolas y ganaderas inapropiadas, entre otras. El resultado es que los niveles de CO₂ en la atmósfera están teniendo efectos en las características del clima (Canadell *et al.*, 2007).

Se sabe que una de las principales causas del cambio climático es el aumento en los gases de efecto invernadero (como dióxido de carbono -CO₂-, metano -CH₄- y óxido nitroso -N₂O-), por lo que se han propuesto acciones para mitigar sus efectos. Una de estas acciones es la conservación y restauración de los bosques, los cuales a través del proceso de fotosíntesis capturan el CO₂ de la atmósfera y lo almacenan como biomasa en troncos, ramas, raíces, hojas y, por último, queda secuestrado en los sedimentos.

La PY como región es particularmente privilegiada ya que cuenta probablemente con los almacenes de carbono más grandes de México, tanto en sus bosques terrestres (**Figura 4**), como sus humedales

costeros (manglares y pastos marinos) (Herrera-Silveira *et al.*, 2016). A los primeros se les conoce como *almacenes de carbono verde*, a los segundos, como *almacenes de carbono azul*.

Se debe hacer una mención especial sobre los bosques de carbono azul, ya que a pesar de que sólo cubren menos del 0.5% de la superficie costera, almacenan más del 50% del total del carbono de los sedimentos de ambientes costeros. Por otra parte, sólo constituyen el 0.05% de la biomasa vegetal terrestre; pero almacenan hasta tres veces más carbono por unidad de área que cualquier ecosistema terrestre, esto principalmente en los sedimentos, su almacén natural (Pendleton *et al.*, 2012; Howard *et al.*, 2014).

La deforestación y la degradación de los bosques es la segunda mayor fuente de carbono a la atmósfera después de las emisiones producidas por los combustibles fósiles, por lo que evitarlas puede ser una estrategia eficaz para reducir las emisiones de carbono y mitigar los efectos del cambio climático.

Es probable que la relación entre clima y la extensa red de agua subterránea sea un factor que favorezca las altas concentraciones de carbono en los ecosistemas de la PY. Esta condición implica una conexión vertical y horizontal entre la precipitación, el agua del manto freático y la vegetación. Uno de los ejemplos más evidentes de esta conectividad acuífero-vegetación en el paisaje de la PY son los petenes, los cuales son los ecosistemas donde se han evaluado los mayores almacenes de carbono (>1100 Mg C/ha).

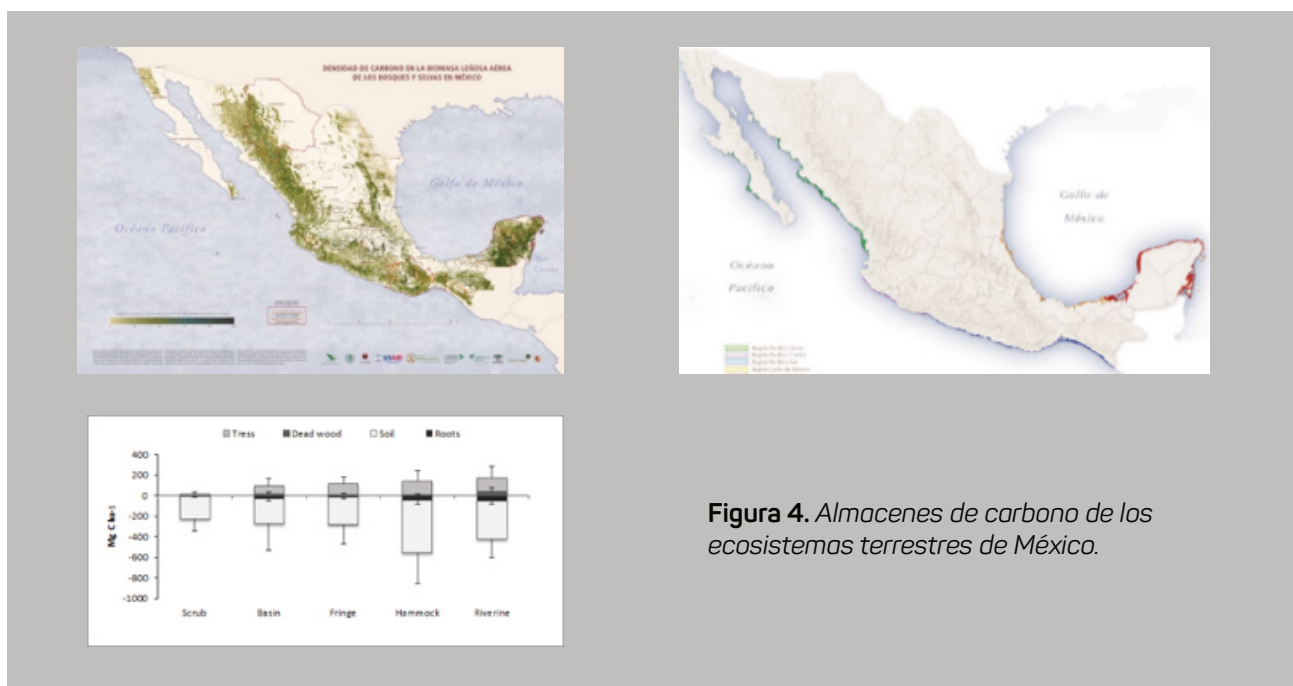
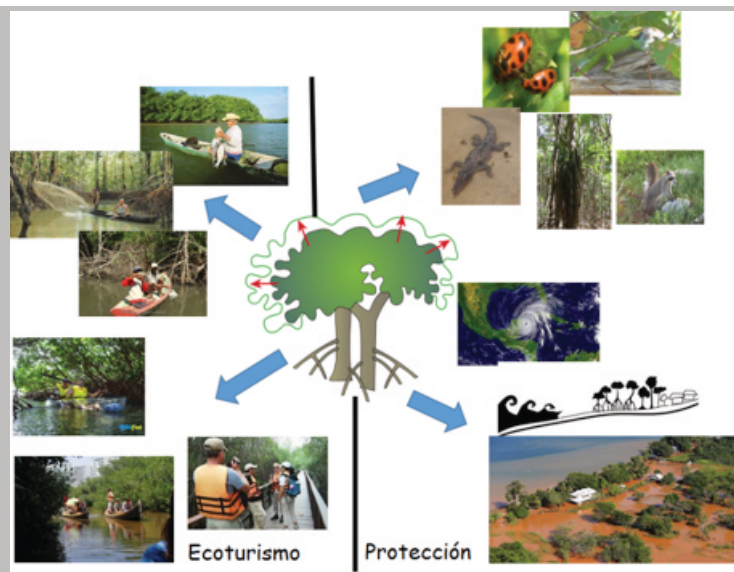


Figura 4. Almacenes de carbono de los ecosistemas terrestres de México.

La PY es particularmente privilegiada en cuanto a los ecosistemas de manglar y pastos marinos (carbono azul). Su escaso relieve topográfico tierra adentro y batimétrico hacia el mar favorecen que estos ecosistemas puedan ocupar extensiones significativas del territorio costero de Yucatán. Además, para los pastos marinos, la relativa buena calidad del agua en la mayoría de la zona costera que se refleja en su alta transparencia (Herrera-Silveira & Morales-Ojeda, 2009) es condición favorable para la vegetación sumergida, cuya extensión aún no está determinada con precisión (CCA, 2016). En el caso de los manglares, el 98% de la línea costera de la PY está ocupada por este ecosistema, cubriendo un área de 421926 ha, lo que representa el 55% de todo el manglar de México (Troche-Souza *et al.*, 2016). En la región kárstica de la PY, además de la topografía, la cercanía del acuífero con la superficie (<1m) que aporta agua dulce y nutrientes están favoreciendo el desarrollo de este ecosistema. Tanto para los pastos marinos como para los manglares, la conectividad que mantienen con otros ecosistemas acuáticos a través del agua subterránea es una característica distintiva de esta región.

El papel ambiental que fungen estos ecosistemas con relación a la captura y almacén de carbono, por parte de manglares y pastos marinos, está en el centro y es básico para otros procesos naturales (**Figura 5**). Por ejemplo, el carbono transformado en biomasa que se refleja en altura, densidad de árboles de manglar y profundidad de sus sedimentos, es el que protege a la costa de los efectos de tormentas, huracanes e inundaciones. Parte de la biomasa y carbono es exportado para beneficio de la trama trófica costera, por lo que favorece la conservación de la biodiversidad, entre ella la fauna de importancia comercial.

Figura 5. Servicios ambientales asociados al carbono de los manglares.



Si bien para los bosques terrestres hay más información, son mucho menos los estudios relacionados no sólo con los almacenes y flujos de carbono, sino con otros elementos (nitrógeno y fósforo) en los manglares y pastos marinos de la península.


La variabilidad de climas, geoformas, condiciones hidrológicas, niveles y tipos de impacto establecen condiciones óptimas para llevar a cabo estudios de variabilidad espacial y temporal de procesos relacionados con el almacenamiento y flujos de carbono verde en bosques y azul en la PY. Identificar patrones de acuerdo con diferentes paisajes con gradientes ambientales, tipos ecológicos y perturbaciones ayudaría a definir procesos relacionados con recursos, fuentes de estrés e hidrología, de acuerdo con diferentes ambientes geomorfológicos e impactos.

No se debe olvidar el mencionar que además del CO₂ hay otros gases de efecto invernadero como el metano (CH₄) que merecen ser estudiados. El metano es especialmente importante en los humedales y en los procesos de producción de las granjas porcícolas, avícolas y ranchos ganaderos, cuyo impacto en el ambiente no se limita a la contaminación del acuífero, sino también a las emisiones de metano, contribuyendo al calentamiento global.

Desde la perspectiva de la interacción ciencia-tecnología e innovación, la investigación sobre la restauración ecológica es prometedora, pero es más incipiente que todas las líneas de investigación desarrolladas en la región. ¿Cómo alcanzar mayores tasas de captura y almacenamiento de carbono a través de acciones de restauración? Ésta es una de las preguntas más relevantes en este tema, con fuertes implicaciones de política pública y relación con la sociedad. La restauración ecológica requiere como estrategia la vinculación y acuerdos institucionales o de grupos y aglutinan a la academia, al gobierno, a las ONGs y grupos organizados de la sociedad civil, ya que es una actividad que requiere acciones de mediano y largo plazo. La restauración se reconoce como una de las estrategias más eficientes de adaptación y mitigación de los efectos del cambio climático en los ecosistemas tropicales.

El carbono verde y el carbono azul de la PY tienen el potencial de contribuir a las políticas de reducción de emisiones a corto y largo plazo, por lo que, partiendo del conocimiento actual, se recomienda incentivar las evaluaciones de los almacenes y flujos de carbono de los diferentes ecosistemas de la península y establecer su papel en la lucha contra el cambio global.



 *Cenote Papakal, ubicado en las cercanías del poblado de Eknakán, Yucatán. En la parte de aguas abiertas se puede observar la formación de columnas. Buzo: Silvia Hernández. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Capítulo 7

Cosmovisión, pirámides y cenotes. Una exploración de la etnología maya desde la arqueología y antropología del turismo en la península de Yucatán

Ricardo Antorcha Pedemonte, Lane F. Fargher y Julia Fraga

Departamento de Ecología Humana, Centro de Investigación y de Estudios
Avanzados del Instituto Politécnico Nacional-Unidad Mérida

Introducción

Los estudios mayistas son abundantes y prolíficos desde hace más de dos centurias. La arqueología maya se institucionalizó en otras latitudes con especialistas y programas de restauración y conservación casi simultáneamente con la Egiptología desde el siglo XIX. Todo esto dentro de la fascinación despertada por las culturas mesoamericanas e inca en los centros de difusión del conocimiento, sobre todo, en los países europeos y de Norteamérica. Grandes enciclopedias y libros han sido escritos por especialistas para demostrar la fuerza de una civilización maya basada en una cosmovisión que hizo posibles grandes proezas y avances urbano-tecnológicos desde una jerarquía teocrática-militar, donde el agua y el alimento, a través de la agricultura del maíz, permitieron el florecer constante de los grupos mayenses, tanto de las zonas altas como las bajas de la península de Yucatán. Las hipótesis y las teorías, las cuales priman en cientos de artículos y libros, son enterradas y revisitadas hasta llegar al sensacionalismo de un *marketing* emocional mundial en pleno siglo XXI con el llamado 2012 o Apocalipsis Maya del “fin del mundo”. Supuestas profecías que vaticinaban una era final de la humanidad alimentaron los bolsillos de grandes y medianas empresas, excepto la de los campesinos mayas que se desplazan día a día en sus campos de cultivo, fronteras con muros o ciudades turísticas y de comercio y servicios en busca de fuentes de empleo.

Pocos estudios escriben y ponen una reflexión como ésta desde una perspectiva interdisciplinaria con un horizonte analítico temporal muy amplio. De esta manera, seleccionamos tres vértices de discusión y demostración: la cosmovisión maya, el patrón de asentamientos y el paisaje cultural en constante transformación desde los tiempos prehispánicos hasta la actualidad. Introducimos el tema del turismo en estos tres vértices para dar cuenta del paso de un sector primario a terciario de la economía global y de México en particular. Desde la década de 1970, sucumbe un sector primario de la economía basada en la tierra para dar paso a un sector terciario en el contexto del capitalismo avanzado y global de pleno siglo XXI. En este proceso de producción basado en los servicios o una era postindustrial, cobra vigencia la diversificación y la segmentación de los mercados de productos y servicios donde el paisaje cultural y los ecosistemas naturales son fuentes primarias de producción a través de la oferta y la demanda de esos bienes y servicios.

La cultura maya, los paisajes de sol y playa, y el mundo subterráneo de los cenotes son las nuevas fronteras para invertir. En este contexto surge el presente capítulo como una exploración de la etnogeología de los mayas y los nuevos escenarios que vislumbramos, así como ventanas de oportunidad a través del geoturismo.

Este capítulo se apoya en un marco teórico y metodológico de la Arqueología histórica y la Antropología social con fuentes documentales y etnográficas. Prevalece una visión diacrónica y regional para comprender un territorio maya con usos y costumbres ancestrales que permean aún la mente y el quehacer cotidiano de miles de personas, quienes habitan esta región. Un futuro sostenible de este territorio maya solamente será posible si somos capaces de fusionar conocimientos expertos y locales.

En este capítulo dejamos claro que los antiguos mayas de la península de Yucatán tenían una estrecha relación con el espacio circundante, integrando las características geológicas del entorno a su comprensión del universo, como parte de una geografía sagrada que explica el orden del cosmos. Entre los elementos más destacados del paisaje, se desarrolla un especial interés por las cuevas, grutas, cenotes (*d'zonot* en maya yucateco) y montañas; los cuales funcionan como pasajes o puertas, que se comunican entre los diferentes planos existenciales.

A propósito, este capítulo examina interdisciplinariamente cómo los mayas antiguos y contemporáneos construyeron conceptos cosmogónicos que después de miles de años aún explican la ubicación, las características y la interrelación del inframundo, los seres humanos y el agua; a través de su conexión con las cuevas, grutas y cenotes, en una correspondencia tan íntima, que la geología y geografía de la península desempeñaban un papel clave en la planeación, ubicación y organización de las ciudades prehispánicas. El capítulo consta de varios apartados, comenzando con la mirada y reflexión arqueológica del territorio maya. Avanza en la descripción del mundo subterráneo en la cosmovisión maya desde tiempos prehispánicos, haciendo énfasis en el uso de las cuevas inundadas o cenotes. Los mitos en la cosmovisión maya cobran vigencia con el dios del maíz y los héroes gemelos del *Popol vuh* o la Biblia sagrada de los mayas. Describimos el elemento cohesionador y vital de los asentamientos humanos como el agua de consumo y el agua de ritual como parte de la etnogeología de los mayas. Continuamos en un último apartado con los mayas contemporáneos: herederos de una cultura milenaria y fuentes de inspiración para el turismo, no sin antes reflexionar a manera de síntesis sobre el vínculo pirámides, playas y cenotes en una nueva forma de economía de las experiencias turísticas en la península de Yucatán.

Una mirada arqueológica al territorio maya desde los patrones de asentamientos y el nexa entre pirámides y cenotes

Las tierras donde se extienden los grupos mayenses o el área maya (desde la costa yucateca del Golfo de México hacia Honduras, El Salvador y Nicaragua, y desde Belice hasta la frontera entre Campeche

y Tabasco) fueron habitadas por cazadores y recolectores al menos desde la época arcaica (cerca de 8000 a 6000 años a.C.).

En este marco, los primeros pueblos habitados por agricultores aparecieron durante el preclásico temprano (2000-1000 a.C.), pero no se tiene la certeza de que hubiesen sido grupos mayas o hablantes de alguna variante del idioma maya. En el caso de la iconografía de este periodo, la cerámica presenta motivos con temas asociados con la religión e iconografía pan-mesoamericana (e.g., serpientes de cielo, cejas en llamas) (Sharer y Traxler, 2006).

Es hasta el preclásico medio (1000-400 a.C.), donde los grabados en piedra y estilos cerámicos presentan ciertas características de la cultura maya (Sharer y Traxler, 2006). Este período (en términos arqueológicos) fue testigo del surgimiento de la civilización maya, con su arquitectura monumental espectacular (pirámides, plazas, etc.) y el desarrollo de centros urbanos con decenas de miles de habitantes.

Los asentamientos urbanos en la península de Yucatán más importantes de esta época fueron Nakbé (ubicado en la cuenca de El Mirador, cerca de la frontera entre México y Guatemala), Xtobó, Xocnaceh y Poxilá (ubicados en el noroeste de Yucatán) (Sharer y Traxler, 2006; Uriarte-Torres, 2011). Durante este periodo, la importancia de las cuevas y cenotes no es muy evidente en los adornos arquitectónicos y la geográfica sagrada. Por ejemplo, parece que los sitios ubicados en el norte de la península no están ligados directamente con accesos al inframundo.

Durante los subsecuentes períodos del preclásico tardío (400 a.C.-250 d.C.) y el clásico (250-900 d.C.) la institución de la corona maya alcanza su apogeo. Los reyes o *k'uhul ajaw* (señor divino) consolidaron su poder y construyeron palacios masivos, templos funerarios con finos acabados y otros trabajos monumentales como los juegos de pelota, *sacbeyab* (carreteras elevadas) y grupos arquitectónicos con patrón en E (Sharer & Traxler, 2006).

En estos periodos, los *k'uhul ajaw* empezaron a enfatizar los mitos asociados con los dioses del cielo, los señores del inframundo y el gran caimán, como parte de sus estrategias político-económicas (Velásquez-García, 2006). Los *ajaw*, especialmente en el norte de la península de Yucatán, seleccionaron lugares cerca de cenotes importantes para sus sedes de poder y en estos lugares construyeron plataformas de grandes dimensiones sobre las que edificaron templos y tumbas debajo de sus fundaciones. En los templos, los señores realizaron ceremonias en donde se recolectaba y ofrecía sangre a los dioses provenientes del sangrado de los oídos, la lengua y el pene (Sharer y Traxler, 2006). A través de estas ofrendas, se realizaban peticiones a los dioses para que enviaran lluvia y vida a la tierra.

Así, los *ajaw* se posicionaban en el punto clave para el mantenimiento de la vida en la tierra, concibiéndose a ellos mismos como el *Yax Che* (árbol verde o ceiba) que sostiene el *axis mundi* entre los planos que ligaban los tres niveles de existencia (Ashmore, 1991). En este mensaje codificado a través de la planeación urbana y el diseño del paisaje sagrado, ellos eran la encarnación del divino Itzamná, el creador y el donante de la vida. En esta estrategia de legitimización, los reyes son separados de todas las demás personas y no se encuentran regulados bajo instituciones que controlen su comportamiento, los castiguen por desviaciones de códigos éticos o que cuestionen el pago de tributo, ya que ellos ahora son la personificación del árbol sostenedor y creadores de la vida en la tierra (Blanton y Fargher, 2008).

Estos patrones son evidentes en la disposición de sitios como Dzibilchaltún, Oxkintok, Ek Balam, Xuenkal, Cobá, Xel Ha y Acanceh entre otros. En Izamal tenemos un ejemplo de la importancia de la cosmovisión en el diseño del espacio urbano, como parte de una geografía sagrada. Se sabe que este asentamiento fue uno de los puntos de peregrinación de mayor importancia para los mayas del norte de la península de Yucatán durante el clásico, porque se creía que el cuerpo mortal de Itzamna Cab Ain (el gran caimán) había sido enterrado en este lugar. La historia cuenta que el dios fue amputado y dividido en cinco partes (cabeza, plexo, extremidades y corazón), los cuales fueron colocados y resguardados en las cuevas y cenotes debajo de cinco basamentos construidos (Millet, 1991).

Durante el clásico terminal (750-950 d.C.) y el posclásico (950-1542/1697 d.C.) el poder de la figura del *ajaw* se reduce y el poder político se redirecciona en gobiernos formados por consejos de poderosos jefes de linajes o casas nobles que se articulan como facciones, siendo el *multepal* una de las formas de gobierno maya más reconocidas para esta etapa (Sharer y Traxler, 2006). No obstante, los reyes, ahora conocidos como *halach winic* (hombre verdadero) continuaban en el ejercicio de funciones, pero sus poderes y presencia en los rituales sagrados se vieron disminuidos, mientras que los mitos sobre la creación del cuarto mundo y la geografía sagrada continuaban como un elemento fundamental en la creación y planeación de zonas urbanas en el posclásico.

Así, la integración de los elementos cenote-plaza-pirámide como *axis mundi* y presentación de Yax Che, se vuelven muy evidentes en los epicentros posclásicos, entre los que podemos mencionar Chichén Itzá (véase abajo), Mayapán, Tulúm, San Fernando, etc. Por ejemplo, el piso del basamento conocido como El Pescador en Mayapán presenta una pintura que contiene una representación de la muerte de Itzamna Cab Ain y la inundación de agua que salió de su cuello cortado.

El caso de Uxmal

Un ejemplo magnífico de la cosmovisión maya, codificada a través de la construcción del espacio físico, lo encontramos en el Grupo de los Pájaros, en el sitio de Uxmal, localizado en la región cultural Puuc, que se extiende entre los actuales estados de Yucatán y Campeche. En dicho conjunto arquitectónico se observa la construcción simbólica de los tres planos del universo. El plano superior es representado por el basamento del templo nombrado *El Adivino* que delimita el costado este, donde son personificados los 13 niveles del cielo, en forma de 13 mascarones de Chaac (dios del agua y la lluvia), los cuales flanquean ambos lados de la alfarda de la escalinata oeste de la estructura.

El espacio terrenal, donde habitamos los humanos, es representado a través de los cuartos y recintos que delimitan los costados oeste, norte y sur del patio interno, los cuales son adornados con diferentes tipos de aves, finamente talladas en piedras calizas y colocadas en las cornisas de los edificios. Es importante señalar que estos edificios cierran el espacio en un diseño de cuatro lados, lo que también podría ser asociado a la forma del mundo y a los cuatro puntos cardinales o rumbos del universo. Para completar el diseño del área, en el centro del patio es edificada una estructura altar cuadrada, la cual cuenta con una piedra de ofrenda o sacrificio en el medio, que se entierra en el suelo, o inframundo, como posible representación simbólica del Yax Che, el árbol sostenedor y centro del *axis mundi*.

El caso de Chichén Itzá

Investigaciones llevadas a cabo en el asentamiento prehispánico de Chichén Itzá han demostrado que el patrón de asentamiento de la ciudad se encuentra íntimamente ligado a las características naturales del área, integrando en el diseño constructivo una distribución espacial que se apega a la cosmovisión maya y a su comprensión del orden del universo.

De Anda y Montero han conceptualizado un cosmograma para la antigua Chichén Itzá (Guillermoprieto, 2013). El centro de este modelo es El Castillo que cubre el cenote central del cosmograma y sus cuatro rumbos están marcados por los cenotes Holtún, Sagrado, Xtoloc y Xkanjuyum, a una distancia de 2600 m; 400 m; 500 m y 1700 m respectivamente, formando una cruz con respecto a la pirámide, que ejemplifica y delimita los cuatro costados del cosmos. Cabe mencionar que el arquitecto Ignacio Marquina, experto en arquitectura prehispánica, y el astrónomo estadounidense John B. Carlson, habían manifestado la posible existencia de un cosmograma para Chichén Itzá basado en los cenotes Sagrados y Xtoloc, pero en ese entonces faltó la referencia de los cenotes Holtún y Xkanjuyum, lo que ahora ha sido posible.

En este sentido, la estructura conocida como El Castillo posicionado sobre un cenote (una entrada al *Metnal* o inframundo maya) se concibe como el *axis mundi*, el árbol sostenedor del cosmos que conecta los tres planos del universo. Esta estructura presenta un efecto conocido como arqueoastronómico, en el cual, durante el equinoccio de primavera, Kukulcán (la serpiente emplumada) serpentea sobre la estructura proyectado como una sombra sobre la alfarda de la escalinata, en un juego de luz y sombra creado por los arquitectos e ingenieros mayas para realizar un efecto visual que hace de la estructura un marcador calendárico ritual.

El mundo subterráneo en la cosmovisión maya desde tiempos prehispánicos: uso de las cuevas inundadas o cenotes

El uso y aprovechamiento de las cuevas y cenotes son un elemento fundamental para el establecimiento y permanencia de los grupos mayenses en el norte de la península de Yucatán, teniendo, como hemos visto, un papel esencial en el desarrollo de la vida diaria y la comprensión del mundo. En este sentido, las evidencias arqueológicas encontradas nos muestran pruebas de que las cuevas y cenotes han sido utilizados de diferentes maneras a lo largo de miles de años, hallando una amplia cantidad de materiales culturales asociados y modificaciones arquitectónicas de los espacios, que nos hablan de su uso y función como parte integral de un sistema cultural.

En este sentido, creemos que tanto la ubicación espacial de los cenotes y las cuevas, como sus características geológicas específicas (cenotes de tipos cerrado, semi abierto o abierto), servían para determinar los diferentes posibles usos y funciones que se les otorgaban, así como su lugar dentro del diseño de la geografía sagrada y la planeación urbana de un asentamiento.

Entre los usos principales encontramos la utilización de los depósitos como fuente de agua para el consumo, siendo éstos el único medio de acceso a agua potable en el norte de la península de Yucatán, por lo que su asociación con asentamientos humanos suele ser evidente (Uc-González y Huchím-Herrera, 1994). En este mismo sentido, encontramos que las cuevas y cenotes han servido como sitios de abrigo para los seres humanos desde tiempos muy antiguos, quienes han encontrado resguardo y protección de las condiciones naturales en las formaciones rocosas, utilizándolas como espacios de tipo doméstico o como albergues temporales.

Evidencias de estas ocupaciones se pueden observar en grutas como Calcehtok y Lol-Tun, en donde se ha documentado una ocupación prácticamente ininterrumpida desde el período preclásico. Entre los materiales más comunes asociados a este tipo de prácticas podemos encontrar cerámica, piedras talladas, metates y haltunes, estos últimos comúnmente empleados para la recolección de agua (Bonor-Villarejo, 1989; González-Licón, 1986).

Otra de las funciones documentadas tiene que ver con la recolección del agua virgen o *suhuy ha* para la realización de ritos religiosos (**Figura 4**), en donde el agua de los cenotes y cuevas es otorgada como parte de las ofrendas de petición para los dioses, sobre todo en ceremonias relacionadas con la siembra (Thompson, 1982; Bonor-Villarejo, 1989). De este modo, las cuevas y cenotes presentan dos uso/función relacionados, en uno, se usan para la obtención del agua para la realización de rituales y, en el otro, las cuevas y cenotes funcionan como escenarios para las ceremonias, las cuales tienen lugar en las inmediaciones del exterior o propiamente en el interior (Landa, 1994; Guillermprieto, 2013) (**Figuras 3 y 4**).

Uno más de los elementos culturales que podemos encontrar de manera constante en las cuevas y cenotes son las representaciones de arte rupestre, entre las que se han documentado tanto pinturas como petrograbados, los cuales, se cree, se encuentran muchas veces relacionados con el uso/función de tipo ritual, en donde se decodifica un lenguaje gráfico que complementa y refuerza el diseño de un medio ambiente construido como parte de una geografía sagrada.

Entre las representaciones más comunes documentadas encontramos esquemas de serpientes asociadas con el agua, cruces con los rumbos cardinales e impresiones de manos en positivo y negativo. Elementos como éstos son visibles en cenotes como Chelpak y Kich'ne en Homún, en el cenote de Yaxcabá, en el cenote Yaxunah y en cuevas como Aktun Uzil, Aktun Bemol, Lol-Tún y Calcehtok, así como en muchas otras reportadas sobre la Sierrita de Ticul (Segovia Pinto, 1981; Streker, 1976, 1978, 1981, 1982, 1984; Streker y Stone, 2003).

De igual modo, trabajos recientes realizados por Rojas y colaboradores (2010) han investigado sobre la presencia de restos humanos en los cenotes, distinguiendo entre dos posibles prácticas: la primera, asociada a la deposición de cuerpos como ofrendas para los dioses, y la segunda, como práctica funeraria, en donde los cenotes son utilizados como cementerios. En ambos casos, la asociación con los cuerpos de agua refuerza la comprensión de estos espacios como lugares de vida y muerte. Entre los cenotes documentados para estos tipos de función, tenemos en Yucatán los cenotes Izah, San Antonio, Sagrado de Chichén Itzá, Holtún y Canún; en Quintana Roo, los cenotes de Las Calaveras y Las Mariposas (Landa, 1994; Rojas *et al.*, 2010; Guillermprieto, 2013).

Por último, las cuevas y cenotes son empleados para la recolección de materias primas, entre las que se encuentran la extracción de arcillas para vasijas, piedra y sascab para la construcción, guano como fertilizante y algunos tipos específicos de minerales como la atapulgita, empleada en la fabricación del colorante conocido como azul maya, y hi, un tipo de caliza cristalizada empleada como desengrasante en la cerámica (Mercer, 1975; Uc-González y Canché-Manzanero, 1988; Roger Méndez, 2002-artesano de Ticul, comunicación personal).

Los apartados anteriores nos llevan a reconocer una línea de tiempo profunda que pervive aún en tiempos contemporáneos sobre el uso de los cenotes en una cosmogonía latente de creación del universo y una fuerte mitología basada en el mundo de los vivos y el reino o plano celestial. Agua y maíz son los dos elementos vitales del pueblo maya desde tiempos prehispánicos.

La cosmovisión maya está relacionada con un orden y equilibrio entre animales cósmicos y humanos que dieron coherencia al paisaje cultural que no puede ignorarse hoy en día si queremos comprender la esencia de una civilización que surgió y se transformó; pero que nunca fue desmantelada en su concepción simbólica y materialista del universo. Un paisaje cultural con los diferentes planos cósmicos incluyendo al mundo subterráneo con el vital líquido del agua sagrada y para el consumo que permitió un patrón de asentamientos humanos y un desarrollo urbano que aún sorprende a los estudiosos y turistas de la actualidad. Por ello, consideramos describir a grandes rasgos en el siguiente apartado parte de esta cosmovisión maya para continuar reflexionando sobre los usos actuales y las potencialidades y oportunidades en los nuevos escenarios de la economía actual, basada en las experiencias turísticas.

Cosmovisión maya: la creación del mundo o el universo y el inframundo o *Metnal*

En las creencias de los antiguos mayas, el mundo (o el universo) era dividido en tres planos cósmicos; el inframundo (o *Metnal* en maya yucateco), la tierra o mundo de los vivos y el cielo o plano celestial (Sharer y Traxler, 2006; Vargas-Pacheco y Arias-Ortiz, 2015). Este orden del universo era conceptualizado como un caimán cósmico (Itzamna Cab Ain o el caimán de agujeros en la espalda) que nada en un océano celestial y se encuentra cubierto por el cielo o el cosmos (Sharer y Traxler, 2006; Taube, 1992; Vail, 2000; Vargas-Pacheco y Arias-Ortiz 2015; Velásquez-García, 2006). En este espacio, la tierra se encontraba ubicada en la espalda del caimán y el inframundo (*Metnal*) correspondía al océano celestial.

Dentro de la cosmovisión maya, cada uno de los planos se encuentra estrechamente ligado el uno con el otro, y ninguno puede existir de manera independiente. Para entender el papel de las personas en la vida cotidiana de los mayas en la época prehispánica y actual, es necesario conocer la concepción y el orden que tienen del mundo y sus respectivos planos, así como la forma en que se apropian e integran las características del entorno (cerros, cenotes y cuevas) en la construcción del paisaje cultural.

La creación del mundo o el universo

Según textos del período clásico en Palenque (grabados sobre las estelas), los antiguos mayas creían que el mundo actual era el cuarto en la historia de la creación (Velásquez-García, 2006). Por esta razón, nuestra historia empieza con la entronización del dios GI –posiblemente un dios de la lluvia y rayos (Taube, 1992)– en el cielo, bajo la supervisión de Yax Naah Itzamnaaj (también llamado *Itzamna*, el creador, la tierra, el cielo y el sol) el 10 de marzo del 3309 a.C. (Velásquez-García, 2006). Aproximadamente 11 años después de este evento, los 13 dioses del cielo entraron en un conflicto con los B'olon ti' K'uh (los nueve señores del inframundo) (**Figura 1**). Durante este conflicto, el cielo se desmorona y los dioses dan muerte a Itzam kab' Ahiin (Itzamna Cab Ain). Es importante resaltar que Itzamna es el dios más antiguo y él es literalmente la tierra y el cielo.

Figura 1. Señor del Inframundo pintado sobre pared interior de la cueva.



En algunas versiones de la historia, el dios GI mató al caimán y en otras Ajmuken Kab' ("el que está enterrado debajo de la tierra") y los nueve señores son responsables del sacrificio (ésta es la versión yucateca) (Velásquez-García, 2006). El asesino o los asesinos degollaron o decapitaron al caimán, liberando una inundación de sangre (en el Clásico) o agua (en el Posclásico), que destruyó la tierra y dio origen a un nuevo orden en el cosmos. En este momento, es posible que los asesinos también hayan invertido al caimán, haciendo que la que era la tierra se localice en la parte inferior (inframundo) y el inframundo se ubique en la parte superior (ahora la tierra).

Estos eventos son simbólicamente importantes en varios niveles. Primero, el creador y dios más importante Itzamna (Taube, 1992), se auto sacrifica o es sacrificado y parte de su esencia vital da origen a un nuevo orden cósmico, donde el maíz y los humanos pueden vivir. Por ende, en la cosmovisión maya la vida proviene de un ciclo interminable en unión con la muerte. Eso quiere decir que la muerte es necesaria para la creación de la vida.

Segundo, el mundo anterior fue invertido, ocasionando que las plantas, los animales y la gente (no humana) que vivía en la tierra, fueran a poblar el inframundo. Así, un nuevo orden cósmico de tres planos se había creado y, para mantener la nueva creación, los dioses colocaron árboles en las cuatro esquinas del mundo (norte, sur, este y oeste) y un árbol en el centro, como *axis mundi*, para mantener el cielo y el inframundo en su lugar (Knapp, 1997; Taube, 1992).

Tercero, estas historias nos muestran que, en la concepción maya, los dioses no son inmortales como se concibe en distintas cosmovisiones, incluyendo la ideología cristiana. Para los mayas, los dioses vivían y morían al igual que los humanos, pero la muerte no marca el final de la existencia o la desaparición de las entidades que estaban vivas, por el contrario, los muertos, incluyendo dioses y humanos (y hasta las plantas y animales) continuaban teniendo un papel activo en el mundo (Tedlock, 1985). Ellos comían, dormían, amaban y peleaban.

Por último, es posible que estos eventos abastecieran el mundo de los vivos con agua, la cual se cayó y fue recolectada en el inframundo (Velásquez-García, 2006). De esta manera, estas ideas reforzaban el concepto de que la muerte y los muertos (residiendo en el inframundo) daban vida a la tierra (v.g., agua). Así, todas estas observaciones conectan con la aserción inicial, que los tres planos de existencia se encontraban interconectados estrechamente.

El inframundo maya o el *Metnal*

El inframundo maya, conocido como *Metnal* (o *Xibalbá* en otras variantes del maya), era una tierra o plano acuoso(a) separado de la tierra o mundo de los vivos por agua (Knapp, 1997; MacLeod y Puleston, 1978). El *Metnal* ocupaba el más bajo de los nueve niveles localizados por debajo del plano terrenal (Knapp, 1997; MacLeod y Puleston, 1978). Era un mundo de oscuridad y muerte (donde residían los difuntos), pero al mismo tiempo, es asociado con agua y fertilidad (Knapp, 1997; MacLeod y Puleston 1978). Este plano tenía noche y día, árboles y animales, los muertos que residían aquí continuaban realizando las mismas tareas que hicieron en vida (v.g., cultivar cosechas, comer, dormir, etcétera). No era un lugar de sufrimiento y castigo, como el infierno que se concibe en la mitología cristiana.

De acuerdo con lo anterior, los seres humanos vivos poseen la capacidad de acceder al inframundo por medio de las cuevas, grutas y cenotes, en donde entran en comunicación con los ancestros y los dioses, los cuales habitan en estos lugares. Para alcanzar el estado mental y espiritual necesario para estos viajes, realizaban diferentes prácticas que les ayudarían en la travesía. Entre estas podemos mencionar los ayunos prolongados, el autosacrificio con sangrado ritual, y la ingesta de plantas psicoactivas (Thompson, 1975; Stone, 1995).

Durante estos rituales, los sacerdotes mayas practicaban una muerte ritual que les permitía entrar al inframundo, en donde buscaban el favor de los seres sobrenaturales como pedir el agua para ofrecer al dios del cielo que generara la lluvia (**Figura 2**) y ofrecer vidas humanas (a través del sacrificio) a los señores del inframundo (**Figura 3**). A su regreso, presentaban un renacer espiritual que culminaba con la salida del cenote o cueva, en algunos casos incluso, adquiriendo un nuevo nombre (Thompson, 1975).

Figura 2. *Tláloc (dios de la lluvia nahua) agarrando el relámpago de Chaac (dios de la lluvia maya), petrograbado sobre pared del interior de una cueva.*

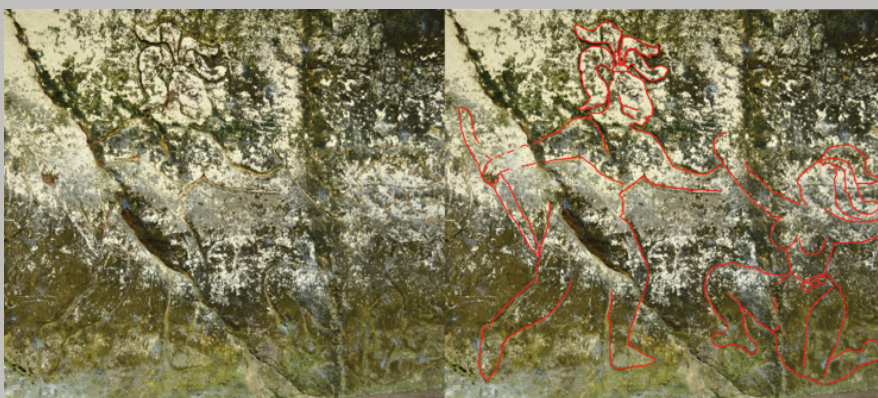


Figura 3. *Preparación del sacrificio de una mujer, petrograbado sobre una pared al interior del cenote.*

El mundo de los vivos o la tierra

La tierra, por su parte, estaba ubicada en la gran espalda del cadáver del caimán, el cual, con su muerte, sirvió para crear la base para el mundo de los vivos (Knapp, 1997). Este nuevo espacio era un mundo lujoso y con muchas texturas en la superficie; era un mundo de montañas y valles, cuevas y cenotes, que abastecían a los humanos con plantas y animales. En este sentido, las cuevas y cenotes representaban agujeros en la espalda del cadáver del caimán, que brindaban acceso hacia el *Metnal* (Knapp 1997; MacLeod y Puleston 1978; Vargas-Pacheco y Arias Ortiz, 2015; Velásquez-García, 2006). A través de estas entradas, los humanos lograban viajar al inframundo sin morir y regresar, si tenían suerte. Por este motivo, las cuevas y cenotes proporcionaban un conducto a través del cual los vivos podían ofrecer sacrificios a los señores del inframundo y a los muertos, los cuales a cambio daban el regalo de la vida, especialmente el agua (Vargas-Pacheco y Arias-Ortiz, 2015).

Las cuevas que contenían agua o los cenotes eran primordialmente importantes, porque los pozos eran asociados con la superficie del inframundo, siendo éste el elemento etéreo que servía como barrera para separar los dos planos de existencia, el cual debían atravesar los que se aventuraran a viajar al inframundo (MacLeod y Puleston, 1978; Vargas-Pacheco y Arias-Ortiz, 2015). Por lo tanto, en la cosmovisión maya, la muerte podía ser representada y conceptualizada como la inmersión en agua (MacLeod y Puleston, 1978). De este modo, los individuos que viajaban al inframundo debían entrar por cuevas o cenotes y realizar una inmersión en agua. Estas personas morían simbólicamente cuando entraban al agua y renacían o resucitaban cuando salían.

El reino o plano celestial

En el extremo opuesto al inframundo, se encontraban las montañas y los cerros, que eran lugares donde los humanos se acercaban al plano celestial y donde podían presentar ofrendas a los dioses del cielo y pedir sus favores (Knapp, 1997). El plano celestial era llamado Oxlahuntik'uh y en él moraban los dioses y los ancestros deificados. Este plano estaba formado de 13 niveles, en donde cada nivel era gobernado por uno de los 13 dioses del cielo (Velásquez-García, 2006).

Otras fuerzas sobrenaturales que se manifestaban en el plano celestial eran el sol, la luna, los planetas y las estrellas. El más importante de ellos era el dios del sol, nombrado como K'inich Ajaw o Hun Ajaw (Taube, 1992), una manifestación de Itzamna (Vail, 2000). Cada día K'inich Ajaw era visto renacer victorioso en el este, ascendía, cruzaba el cielo y moría al terminar el día para caer nuevamente al inframundo, ubicado en el oeste (Sharer y Traxler, 2006). Durante cada noche, el sol realizaba una travesía a través del inframundo, un viaje peligroso y arriesgado, para

reemerger en la mañana con una nueva vida. Este ciclo es mantenido por los dioses y ancestros que residen en el cielo y el inframundo, así como a través de las ofrendas de sangre humana y de la cual dependían los dioses como alimento vital para sobrevivir (Knapp, 1997). En retribución, los dioses, siempre y cuando estuvieran satisfechos, abastecían a la tierra con servicios que mantenían la vida, como la lluvia, el viento y el sol.

El dios del maíz y los héroes gemelos

Esta relación entre la muerte, la vida, el inframundo (tierra de los muertos) y la tierra (mundo de los vivos) está claramente capturado en la historia-mítica del dios del maíz y los gemelos héroes registrado en el *Popol Vuh* (Tedlock, 1985). Esta historia empieza con los primeros días del cuarto mundo, un mundo mal definido; gris, sin día ni noche; un mundo que se encontraba en caos. En este espacio, un ave monstruosa llamada Vukub Kaquix dominaba la tierra, concibiéndose a sí misma como el sol y la luna. Los primeros dos humanos conocidos fueron los gemelos Hun Ajaw -el dios del maíz, un dios asociado a Itzamna (Vail, 2000) y Vukub Hunahpu, quienes salieron vencedores de una lucha con Vukub Kaquix. Esta victoria liberó al sol para gobernar el día y la luna para controlar la noche.

Después de vencer a Vukub Kaquix, los gemelos descienden al inframundo para jugar un juego de pelota contra los dioses del *Metnal*, pero son derrotados y, en consecuencia, los señores del inframundo los sacrifican (Tedlock, 1985). Después del sacrificio, Vukub Hunahpu fue enterrado debajo del juego de pelota y la cabeza de Hun Ajaw, que había sido decapitada, fue colocada en una jícara. Por supuesto, la noticia del juego y la derrota de los gemelos se habían extendido, provocando entre otras cosas, la curiosidad de una de las hijas de los señores del inframundo, quien a escondidas visitó a Hun Ajaw. Durante esta visita, Hun Ajaw alcanzó a escupir en su mano y ella quedó embarazada, lo que desató la furia de su papá y ella escapó a la tierra y se fue a vivir con la abuela de los gemelos sacrificados. De esta manera el dios del maíz sostenía la procreación de los humanos en la tierra.

Evidencias encontradas en pinturas sobre vasijas y murales del preclásico y clásico, indican que después de que los señores del inframundo colocaron la cabeza de Hun Ajaw en la jícara, el hacha encendida de Chaak (el dios de la lluvia) partió la tierra hasta el inframundo (Sharer y Traxler 2006). La grieta hizo posible la resurrección de *Hun Ajaw* y su transformación en el árbol de la vida. Este árbol creció y tiene sus raíces en el inframundo, elevándose hasta el plano celestial, para traer comida y otras cosas que sostienen la vida. Así, el dios del maíz está fuertemente ligado a Itzamna y de esta manera crea las condiciones para que sus hijos e hijas (los humanos) puedan sobrevivir en la tierra.

Más adelante, el relato nos cuenta cómo la mujer embarazada dio a luz a dos héroes gemelos, los cuales después de haber sido criados bajo las enseñanzas de su abuela y madre, encuentran el equipo de juego de pelota de su papá (el dios del maíz) y se transforman en los mejores jugadores del mundo; tan buenos que los señores del inframundo decidieron invitarlos a descender al *Metnal* y jugar contra ellos (Tedlock, 1985). Durante el día jugaban pelota y por la noche eran sujetos a pruebas mortales que ponían a prueba su astucia. Sin embargo, los señores del inframundo no pudieron engañar a los gemelos, quienes ganaron el juego y superaron cada una de las pruebas con perspicacia e inteligencia. Pero no había salida.

Para escapar, los gemelos deciden suicidarse brincando al pozo de fuego, lo que pone muy contentos a los señores del inframundo, pues lo consideran una victoria (Tedlock, 1985). Los dioses tiran al río las cenizas de los gemelos para deshacerse de ellos, pero astutamente, los gemelos renacen y regresan al *Metnal* para tomar su venganza. La tarea no fue fácil, los señores del inframundo eran fuertes, por lo cual, los gemelos idearon un plan para engañarlos, que consistió en presentar un truco donde decapitan a uno de los gemelos y después lo resucitan. Los señores asombrados desconfían de la artimaña y solicitan a los gemelos hacer lo mismo con sus cabezas, para así no ser engañados. De esta manera los gemelos decapitaron a los señores, pero sin resucitarlos. Después de su victoria, los gemelos renacen nuevamente del inframundo como cuerpos celestiales, formados ahora como el sol y Venus (Tedlock, 1985).

Agua de consumo y agua de ritual como parte de la cosmovisión maya desde tiempos prehispánicos hasta la actualidad

Dentro de este contexto, uno de los aspectos más importantes es que el agua es el elemento que mantiene una relación. Además de su importancia como un recurso vital para el cuerpo humano, es un componente fundamental que funciona como elemento de separación entre ambos planos, el mundo de los humanos y el de los dioses.

Es esencial realizar una diferencia entre el agua utilizada para el consumo regular de las personas y el agua que es ofrecida durante los rituales a los dioses, conocida como *suhuy ha*, traducida como "agua sagrada o agua virgen", sin contaminación (Bonor, 1989).

Para la obtención del *suhuy ha*, el *h'men* (sacerdote maya) tenía que realizar el viaje ritual al inframundo o *Metnal*, adentrándose al interior de una cueva y descendiendo en la oscuridad "el lugar donde no existen las sombras", en una posible representación del viaje de los héroes gemelos al inframundo. Durante este viaje, el sacerdote recogería el agua acumulada en los depósitos o cenotes ubicados en las profundidades de las cuevas, recolectando aquella que nunca había sido tocada ni por la luz del sol, ni por una mujer (*h'men* Don Gerardo-Acanceh, comunicación

personal 2001) (**Figura 4**). En este viaje, el *h'men* además de recolectar y proporcionar el agua sagrada para las ofrendas, es visto como el elemento masculino fecundador, que se introduce en el elemento femenino, que es la gruta, visto como el útero de la tierra, para fecundar desde el inframundo; concibiéndose así la dualidad entre la vida y la muerte (Streker, 1984; Thompson, 1975; Thompson, 1982; Brady, 1989; Stone, 1995).

Así, tenemos que el *suhuy ha* era utilizada en la época prehispánica en diferentes tipos de ceremonias, entre las que se incluían principalmente rituales de peticiones de lluvia para la siembra y rituales de pubertad en la etapa de transición de los varones, en la cual el agua era entregada como parte de la ofrenda a los señores del Oxlahuntik'uh (Landa, 1994). En la actualidad, los grupos mayenses continúan utilizando el *suhuy ha* en algunos rituales relacionados con la milpa, como el *chaa chaac* o "ceremonia de la milpa", en donde se pide agua y viento adecuados para la siembra. Estas ceremonias son aún vigentes en varias regiones de la península de Yucatán y están siendo revaloradas en escenarios actuales donde las rutas turísticas están cada vez más abiertas al flujo de personas, ideas y mercancías. Entre ellas nuevas maneras de extender negocios a través de parques temáticos para recrear el mundo maya a través del espectáculo y las vivencias cotidianas de las mujeres y hombres del campo (Fraga, Khafash y Córdoba, 2015).

Figura 4. Metate posicionado para recolectar agua sagrada (*suhuy ha*) dentro de la gruta.



Los mayas contemporáneos: herederos de una cultura milenaria y fuentes de inspiración para el turismo

En los apartados anteriores describimos y caracterizamos, con base en una fuerte investigación arqueológica y etnológica, a un territorio maya peninsular con patrones de asentamientos cuyo vínculo entre pirámides y cenotes con los mitos de la creación del universo permitieron comprender la cosmovisión maya vasta y compleja desde tiempos prehispánicos hasta la actualidad.

En los tres apartados que siguen describimos la situación contemporánea del avance del turismo desde la creación de la ciudad turística de Cancún, con fuertes impactos en la demanda de actividades de ocio y entretenimiento mundial, basada en la expansión de los parques temáticos y cenotes subterráneos (Khafash *et al.*, 2015), así como el avance de modelos de turismo Premium con nuevos esquemas de urbanismo, rompiendo la visión ancestral del uso de los ecosistemas costeros (Benavides, 2014). Un modelo de turismo de masas que en los últimos 50 años ha seguido con el modelo Balear español (Jiménez y Sosa, 2010) donde se persigue la rentabilidad inmediata de la infraestructura turística y de los servicios ambientales.

Sin embargo, una fuerte tendencia en la demanda turística desde la década del año 2000 y siguiendo lineamientos mundiales sobre la protección y conservación de la biodiversidad marina y terrestre han logrado reorientar políticas de usos de los recursos naturales que permitan encaminar esfuerzos de desarrollo sostenible. Los actores globales de la conservación de la biodiversidad (Banco Mundial, PNUD, IUCN, TNC, WWF, entre los principales) han encontrado nuevas maneras de mercantilizar la naturaleza y la cultura local abriendo ventanas hacia la combinación del turismo de masas y turismo alternativo potencializando las áreas de conservación de bosques mediante categorías de manejo.

Pirámides, playas y cenotes: el despertar de un mundo maya antiguo y actual

Las zonas arqueológicas de Yucatán fascinaron a exploradores y aventureros desde el siglo XVIII, sobre todo europeos y norteamericanos. Pero no es hasta el siglo XIX que se genera una corriente de estudiosos provenientes de universidades y centros de investigación con programas definidos para excavar los sitios reportados con grandes riquezas arqueológicas como la zona del Puuc y los Itzaes en Yucatán.

Peraza y Rejón (1989) señalaron que, a nivel regional, el norteamericano William Young inició en 1905 por primera vez de forma comercial la promoción turística al organizar una sociedad de excursiones a las "ruinas" de Yucatán. Para ir a Uxmal o Chichén Itzá era necesario llegar

por ferrocarril hasta Muna y Dzitán, posteriormente llegar a los sitios arqueológicos utilizando caballos o bolán (carreta techada con una trama de sogas y utilizando colchonetas para sentarse). Hacia 1940, el estado decide planear el desarrollo turístico al impulsar la construcción de carreteras empezando con un ramal de Mérida a Ticopó en dirección a Pisté-Chichén Itzá que se logró terminar en 1948. Hasta 1960, se impulsaron otros ramales carreteros pavimentados, de servicios, hotelería y restaurantes teniendo los ejes de Mérida-Chichén y Uxmal. El Instituto Nacional de Antropología e Historia concentró esfuerzos para la restauración y conservación de monumentos arqueológicos en el marco de un Comité Estatal Pro-Turismo creado en 1959 (Sarlat, 1941; Suárez-Molina, 1977).

Las pirámides mayas fueron motivo de fascinación en el imaginario extranjero más que en el nacional o regional. Los campesinos macehuales de la zona maya de Quintana Roo sabían desde la Guerra de Castas (1847-1901) a través del contacto con los ingleses de las Honduras Británicas (Belice) que los viajeros y aventureros que llegaban a comerciar armas por madera y chicle, de paso preguntaban si sabían dónde estaban las pirámides (Don Juan, trabajo de campo, enero de 1984 en Zona Maya de Quintana Roo).

En el caso de Tulúm, en parte se dio a conocer en 1922 con los arqueólogos que trabajaban en Chichén Itzá. En la década de 1950, cuando los habitantes de Cozumel llevaban a viajeros y exploradores al continente para explorar el área en búsqueda de embarcaciones piratas sumergidas, conocieron las "ruinas". En la década de 1970, el sitio fue motivo de fascinación de Fellini, un cineasta Italiano que se propuso dar a conocer la cultura maya a través de las pirámides.

Tres décadas después, empieza la exploración de Punta Cancún-Puerto Juárez e Isla Mujeres para crear un Centro Integralmente Planeado con financiamiento del Fondo de Promoción e Infraestructura Turística (INFRATUR) a nivel federal, a través de fondos del BID (la Zona Hotelera de Cancún) (Entrevista a ingeniero constructor fase inicial Cancún, agosto de 2008).

Los actores globales del turismo (OMT, BID, BM) empiezan a organizar en 1988, a través de los gobiernos federales de México y Guatemala, el llamado *Programa Mundo Maya*, con amplias expectativas para crear inversiones uniendo las zonas arqueológicas, las playas del Caribe, la industria de las artesanías; pero, sobre todo, abrir las fronteras a las cadenas hoteleras y detonar la segunda fase de Cancún como polo de desarrollo regional, nacional y mundial (García de Fuentes, 1979; Córdoba y García, 2003; Macías y Pérez, 2009).

Chichén Itzá, más que Tulúm por su categoría de zona arqueológica y ya inscrita en los sitios de patrimonio mundial, resultaría visita obligada para

la corriente de turistas que desembarcaban en Cancún, procedentes de más de 40 países, sobre todo, norteamericanos de la costa atlántica.

Pirámides y playas fueron la combinación perfecta en toda la década de 1980 y 1990 hasta el surgimiento de la capital de la Riviera Maya en 1994: Playa del Carmen. Antes de esta fecha, se conocía como el corredor Cancún-Tulum (Khafash y Fraga, 2009). A medida que se ampliaba la zona de ocio, entretenimiento y turismo entre Cancún y Tulum, la diversificación de la oferta era una preocupación de los inversionistas nacionales enmarcados en programas y planes sexenales de una apuesta al crecimiento del sector terciario de la economía. Además no olvidemos que Yucatán experimentaba el colapso después de 150 años de una industria de plantación fincada en la fibra del henequén o sisal y dejaba en el abandono a más de 60000 trabajadores que dependían de un ingreso o subsidio a través del Banco Rural (Fraga, 2000).

Conforme se saturaba el segmento convencional del turismo (sol y playa) en los 130 kilómetros del Caribe mexicano y aumentaba la presencia de turistas en Chichén Itzá, la expansión de los parques temáticos en la Riviera Maya, sobre todo el del Grupo Xcaret (Khafash y Fraga, 2011, 2012; Córdoba, 2009; Fraga, Khafash y Córdoba, 2015) redimensiona el mundo maya con la industria del entretenimiento a través del recurso agua (cenotes subterráneos) y la cosmovisión maya a través de ceremonias, usos y costumbres como el Festival de Vida y Muerte llevado por esta empresa a declararlo Patrimonio Cultural Intangible por la UNESCO.

Las rutas turísticas iniciales entre Cancún y Chichén Itzá encaminan al turista a conocer uno de los cenotes emblemáticos del Mundo Maya, el de Chichén, y luego el de Valladolid. La expansión de la Riviera Maya es mucho más acelerada que la de Cancún, al duplicar el número de cuartos de hotel. Un representante de la Secretaría de Turismo de la zona afirmaba que lo que a Cancún le llevó 40 años, a Playa del Carmen le bastó una década. Esto significa un crecimiento económico basado en la industria de la construcción, principalmente, hoteles de cadenas globales, arrendadoras de autos, agencias de viajes e industria artesanal (Fraga *et al.*, 2010).

La expansión de la Riviera Maya hacia Yucatán: ¿la búsqueda de cenotes más que las playas?

No podemos hablar del turismo sin una perspectiva regional, nacional y global, mucho menos de fronteras estatales e inversiones privadas en los límites estatales en el contexto del capitalismo corporativo terciario.

La diversificación de la oferta turística obedece a la demanda y a las tendencias contemporáneas del turismo postfordista porque se está en la búsqueda de satisfacer la pirámide emocional del viajero, quien está

más educado, mejor informado y dispuesto a pagar en el mercado de las emociones (Alonso, 2001; Khafash, 2015). Es así que la oferta para el turista que llega a la península de Yucatán vía Cancún o Mérida está dispuesta a ofrecer campos de golf mirando las pirámides, luego sumergirse en aguas subterráneas y después asolearse en las playas. Por lo menos éste es el panorama que se visualiza en la Riviera Maya. La demanda es fuerte y estas nuevas tendencias obligan a liberalizar las tierras comunales donde se encuentran los cenotes y la máxima biodiversidad (reformas a las leyes constitucionales sobre la tierra, aguas y bosques).

La desenfrenada búsqueda de cenotes para privatizarlos proviene de esos inversionistas de la Riviera Maya, Cancún y Yucatán que apuestan al turismo ante la demanda de viajeros postfordistas. El incremento de la clase media y los tiempos de ocio están orientando a los modelos de negocios de grandes cadenas hoteleras que ahora ofrecen transporte a las zonas hoteleras o pueblos, para vivir la experiencia de ceremonias mayas, incluyendo las bodas o enlaces matrimoniales en las cuevas y cenotes.

El papel del estado promotor del turismo también es financiador de esta economía de experiencias al invertir en el plano de la infraestructura que permita unir zonas arqueológicas, rutas de cenotes y áreas naturales protegidas (ANP).

Los impactos actuales del turismo en cenotes aún no han sido evaluados a profundidad, se tienen trabajos que demuestran la alta contaminación de cenotes turísticos en Quintana Roo (Gold, 2011) y Yucatán (Pacheco *et al.*, 2012) por coliformes fecales, uso indiscriminado de plaguicidas e incluso fármacos derivados de las drogas consumidas por los turistas.

La demanda de entretenimiento y ocio a partir de los recursos acuáticos subterráneos o cenotes con sus cuevas será mayor en los próximos años ¿qué se puede hacer ante esta demanda turística con el uso sabio ancestral y actual de los diferentes actores involucrados, sean locales, nacionales y mundiales?

Una apuesta al turismo cultural desde las tendencias contemporáneas

No podemos frenar las inversiones privadas ante la demanda del turismo y las nuevas tendencias en la economía de las experiencias en el contexto del capitalismo global. Lo que sí podemos hacer es una difusión del conocimiento cada vez más integrado desde las diferentes áreas del conocimiento. Para ello, necesitamos tener más investigación, acción participativa y una visión de cuenca con los científicos sociales, naturales y de las ingenierías y ciencias exactas. El sistema kárstico de la península de Yucatán tal parece que fue mejor manejado en tiempos de los mayas antiguos al no construir grandes asentamientos urbanos

en los bordes de los litorales. Tal parece que la evidencia arqueológica nos muestra que la cosmovisión maya fincada en los mitos de la creación y las capas del mundo terrenal y divino pudo conducir a una élite conocedora del entorno acuático y subterráneo, ¿necesitamos nuevos mitos contemporáneos o validar los ancestrales? ¿Cuál deberá ser el nuevo papel del estado protector de la cultura maya ancestral ante un capitalismo corporativo terciario? ¿Necesitamos educar para nuevos negocios con sabiduría ancestral?

La Arqueología desde sus diferentes áreas, incluyendo la subacuática, tiene que ser una plataforma de conocimiento etnoecológico que permita formar recursos humanos, algo parecido a una capa de basalto con propuestas acertadas para potenciar nuevos usos de los espacios subterráneos como los cenotes y los vínculos con las zonas arqueológicas existentes. En conjunto con el arsenal etnológico de los antropólogos sociales, urbanos y ecológicos formar otra capa de basalto para diseñar modelos de negocios que hagan posible un geoturismo orientado a beneficiar, no solamente a la iniciativa privada, sino a las comunidades que afrontan la mayor pérdida que se les avecina: la sabiduría de sus ancestros. Respetar y educar abre posibilidades de inclusión más que de oportunismo ante la nueva economía de las experiencias turísticas: ¿cómo diseñar estas metodologías con los diferentes actores locales y globales? Ese diseño debe ser el programa a largo plazo.

Las áreas disciplinarias de las ciencias químicas, físicas, geológicas y tecnológicas tienen que estar en la pirámide de los estudios y monitoreo de las condiciones del clima, contaminación, remediación y aprovechamiento desde el nivel molecular del agua como recurso estrella del universo y no olvidar la mejor molécula: la cosmovisión maya que pervive y que puede ser repotenciada.

Reflexiones finales

Desde esta perspectiva antropológica, donde se cruzan las experiencias arqueológicas y etnológicas de los autores, mostramos los mitos y creencias prehispánicas y contemporáneas sobre la creación del universo, el líquido sagrado almacenado por los dioses con sus guardianes en los cenotes, los patrones de asentamientos prehispánicos tomando el caso de dos sitios de patrimonio arqueológico mundial (Uxmal y Chichén Itzá); el dios del maíz, alimento del alma y del mundo de los vivos desde la creación de los hermanos gemelos; el reino o plano celestial; el agua de consumo y el agua sagrada solamente para los dioses hasta llegar al asalto contemporáneo del turismo de masas y alternativos con una potente industria del ocio; el entretenimiento y los territorios de consumo turístico ante nuevas concepciones del uso de la biodiversidad de la península de Yucatán. La demanda de cenotes subterráneos y los nuevos usos de la cultura para esta industria "sin chimeneas" requiere un alto para la reflexión y nuevos

estudios desde la transdisciplina que lleven a un uso sostenible para las presentes y nuevas generaciones de ciudadanos globales que habitan temporal o permanentemente las ciudades de la península de Yucatán e intentan convivir con las comunidades mayas locales.

Para finalizar, el capítulo concluye con una discusión sobre la enorme riqueza latente y en una adecuada comprensión de la geografía sagrada de los mayas y la construcción de sus ciudades, como parte de una oferta geo-eco-arqueo-turística, con un alto potencial de aprovechamiento para la región.

En este marco, merece la pena reflexionar sobre el territorio maya peninsular y el de Yucatán en particular, con su enorme riqueza arqueológica, acuática, florística, faunística y de usos ancestrales sobre los recursos naturales con altas potencialidades para diversificar la oferta turística que beneficie a una amplia gama de actores locales y globales. La balanza parece inclinarse hacia la privatización de espacios tematizados y recrear la cultura maya simplemente contratando con salarios mínimos a los campesinos que aceptan recrear sus ceremonias porque no tienen otra opción. Sin embargo, el capital privado debe tener una verdadera responsabilidad social corporativa para hacer posible que se generen y se reproduzcan conocimientos para las nuevas generaciones de mayas locales que deseen ser emprendedores y no simplemente empleados de servicios, cocinando y regando las faldas de los hoteles, o eliminando el sargazo de las playas. Falta capacitación para nuevos negocios y las empresas que ya se enriquecieron demasiado con el patrimonio arqueológico y cultural deberían invertir en cuadros de jóvenes emprendedores que se dispersen a lo ancho y largo de los pueblos para combatir la pobreza extrema. No se trata simplemente de vender un patrimonio cultural, sino educar en la sostenibilidad ambiental, económica y social. ¿Con justicia socioambiental se podrá lograr 3000 años más de preservación del conocimiento maya ancestral que se resiste a sucumbir?

Nuestra respuesta es positiva, de acuerdo con lo anterior, la cosmovisión y la geografía sagrada del universo maya quedan espacialmente materializadas en sus ciudades, sobre todo en los epicentros, en donde se observa la integración de cuevas y cenotes; con pirámides, caminos y altares, generando una oportunidad turística única y espectacular para disfrutar, tanto de la arquitectura prehispánica, como de grutas y hermosos cenotes, gozando a su vez de un acercamiento con bosques saludables y sostenibles creados durante milenios por los mayas (Fedick, 1996; Ford y Nigh, 2009).

En este capítulo se muestra un especial interés por los cenotes y el agua, en el mundo antiguo de los mayas, en la vida cotidiana de los gobernantes y su religión, mostrando cómo la ecología del paisaje y la comprensión del cosmos maya, se relaciona con la integración de

la silvicultura y agricultura de los bosques sostenibles, así como la cultivación selectiva de especies de árboles claves (Kanan K'aax), tal es el caso de la ceiba, símbolo de los gobernantes mayas en su concepción como sostenedores del mundo (Ford y Nigh, 2009; Kepecs y Boucher, 1996; Rivera-Núñez, 2014).

En consecuencia, creemos que esta oferta basada en el geoturismo debe ser integrada como un programa educativo bien desarrollado, con guías formados y preparados, que brinden al turista la experiencia de vivir el mundo maya en su totalidad, a través de paquetes turísticos pequeños, a sitios arqueológicos claves, como lo son Ek Balam, Chichén Itzá, Mayapán, Dzibilchaltún y muchos otros, en donde los mayas dejaron plasmada en piedra su visión del universo, desde el mundo subterráneo inundado (a través de los cenotes) hasta el cielo (por medio de las pirámides).



*Cenote Chihuo Hol II, ubicado en las cercanías del poblado de Mucuyché, Yucatán.
Buzo: Juan Baduy. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*





Capítulo 8

Los cenotes y el geotursismo: una atracción geológica mundial

Luis Carcavilla¹ y Javier Lario²

¹Instituto Geológico y Minero de España

²Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)



Introducción

La relevancia y, sobre todo, el valor estético y escénico de determinados elementos del patrimonio geológico puede convertirlos en recursos turísticos lo suficientemente importantes como para transformarse en uno de los principales atractivos de un determinado entorno. Por ello, en los últimos años ha ido tomando forma el concepto de geoturismo, entendido como *viajar con objeto de experimentar, aprender y disfrutar el patrimonio de la Tierra* (Hose, 2000), de manera que permita al visitante conocer y disfrutar del patrimonio geológico, así como fomentar y estimular en él actitudes favorables para su conservación.



Figura 1. El Parque Nacional del Gran Cañón, en Estados Unidos, uno de los principales destinos turísticos de naturaleza del mundo. Fotografía: Luis Carcavilla.

El análisis del número de visitantes refleja el poder de atracción turística que ejercen algunos enclaves de interés geológico. Algunos ejemplos son los 520000 visitantes anuales de la Calzada de los Gigantes (Irlanda), los más de 2 millones de visitantes de la Mammoth Cave (EEUU), o los 4 millones 200 mil visitantes anuales del Parque Nacional del Gran Cañón (EEUU) (**Figura 1**). Incluso algunos países basan buena parte de su estrategia de desarrollo y promoción en la existencia de elementos geológicos singulares, entre otros aspectos naturales y culturales, como Islandia (**Figura 2**), Nueva Zelanda, Argentina o Nepal.



Figura 2. Algunos países, como Islandia, centran gran parte de sus ofertas turísticas en la existencia de rasgos geológicos notables, que actúan como focos turísticos. Fotografía: Luis Carcavilla.

Estos datos confirman que el turismo geológico es una realidad (Carcavilla, 2012); pero como más adelante se describirá, se ejerce en la mayoría de los casos de manera inconsciente o involuntaria y se le han asignado otros nombres como ecoturismo o turismo natural; no obstante, la naturaleza clara y eminentemente geológica de los recursos visitados ha propiciado que se extienda el término geoturismo como caso concreto de ellos. Una buena muestra de este tipo de turismo es la iniciativa de la declaración de Geoparques, originalmente europea, pero actualmente extendida a nivel mundial bajo los auspicios de la UNESCO, que ponen de manifiesto cómo los componentes geológicos del territorio pueden ser un poderoso reclamo para atraer visitantes y, a la vez, ser utilizado como eje en la creación de programas de desarrollo local y regional (Henriques y Brilha, 2017).

El geoturismo es un emergente proceso global (Dowling y Newsome, 2006). Por ello su estudio se ha impulsado en los últimos años y se celebran reuniones, simposios y conferencias monográficas, como las de Perth (Australia) en 2008 y 2015, Pretoria (Sudáfrica) en 2009, Malasia en 2010, Portugal en 2011, Hong Kong en 2013, Florencia (Italia) en 2016 y así un largo etcétera.

Definición y alcance del geoturismo

Desde el punto de vista etimológico, geoturismo se compone de dos vocablos: geo y turismo. El primero viene del término griego *Gaia*, la madre tierra de la que nacen (según la mitología griega) todas las criaturas vivientes y no vivientes. La propia etimología de la palabra centra su significado en las características geológicas de un lugar. El geoturismo, por tanto, debe revelar y descubrir a los visitantes las características particulares de *Gaia* en lugares concretos donde éstas sean destacadas y/o únicas y no en cualquier sitio, del mismo modo que el ecoturismo centra su atención en ecosistemas especiales o en características peculiares de los mismos. Por su parte, el turismo es definido por la Organización Mundial del Turismo de las Naciones Unidas como *las actividades que realizan las personas (turistas) durante sus viajes y estancias en lugares distintos al de su entorno habitual, por un período consecutivo inferior a un año y mayor a un día, con fines de ocio, por negocios o por otros motivos* (World Tourism Organization, 2011).

Existen diversas definiciones publicadas del término geoturismo, cada una de la cuales introduce matices interesantes. La primera definición de geoturismo apareció en una revista como *la provisión de recursos interpretativos y servicios para promocionar el valor y beneficio social de los lugares de interés geológico y geomorfológico, y asegurar su preservación y su uso por parte de estudiantes, turistas u otro tipo de visitantes* (Hose, 1995). Una definición similar es la proporcionada por Dowling y Newsome (2006), quienes afirman que *el geoturismo es un turismo sostenible cuyo objetivo principal se centra en experimentar los rasgos geológicos bajo un entendimiento cultural y medioambiental apreciando su conservación, y que es locamente beneficioso*. Ruchkys (2007) define el geoturismo como *un segmento de la actividad turística que tiene al patrimonio geológico como principal atractivo y busca la protección por medio de la conservación de sus recursos y de la sensibilización del turista, utilizando la interpretación para volver este patrimonio accesible al público lego y promover la divulgación y desarrollo de las Ciencias de la Tierra*. Por último, Sandry (2009) afirma que *el geoturismo es un tipo de turismo basado en el conocimiento, conservación e interpretación de los atributos abióticos de la naturaleza y su integración interdisciplinar en la industria del turismo, buscando acercar los lugares de interés geológico al público general, además de mostrar aspectos culturales con ellos relacionados*.

El enfoque proporcionado por estas cuatro definiciones contrasta con otro recientemente surgido e impulsado por la Fundación *National Geographic* y que ha provocado una fuerte polémica, pues lo define como *el turismo que sustenta o contribuye a mejorar las características geográficas de un lugar, ya sea el medio ambiente, patrimonio histórico, aspectos estéticos, culturales o el bienestar de sus habitantes* (Tourtellot, 2009). Este enfoque "geográfico", en cierto modo, coincide en objetivos con la otra acepción, pero la polémica ha surgido por utilizar un término que ya era utilizado con anterioridad desde hace 15 años con un significado preciso. Por el momento, los intentos promovidos por la Red Europea de Geoparques y otras instituciones para convencer a *National Geographic* de que cambie el término han sido infructuosos y es más que probable que ambos conceptos deban convivir en el futuro bajo un mismo nombre.

En cualquier caso, en este artículo nos referiremos al geoturismo desde el enfoque "geológico", es decir, a *facilitar el entendimiento y proporcionar servicios para que los turistas adquieran conocimientos de la geología de un lugar, más allá de como meros espectadores* (Hose, 2006). Según este enfoque, el geoturismo se basa en la utilización del patrimonio geológico como recurso por su interés científico, naturalístico, cultural, recreativo y didáctico. La existencia de elementos geológicos patrimoniales en una región puede constituir un recurso que favorezca el desarrollo social, económico e incluso cultural de la sociedad (Carcavilla *et al.*, 2007). Por ello, el geoturismo busca atraer público y generar un beneficio socioeconómico, basándose en la creación de una infraestructura turística de apoyo a algunos elementos del patrimonio geológico presentes en una región. El geoturismo empieza a ser considerado como una gran oportunidad para el desarrollo de zonas eminentemente rurales, aunque también existen excelentes ejemplos de geoturismo urbano que más adelante serán descritos. Pero el geoturismo debe basarse siempre en una estrategia ligada a la geoconservación, a una doble escala: regional por un lado, con la que debe ser consecuente y, si existe, contribuir a promoverla; y local o particular del elemento geológico puesto en valor por otro, condición absolutamente necesaria para su uso turístico.



Figura 3. Las cuevas turísticas y, en general, las manifestaciones kársticas tienen un gran poder de atracción turística. En la imagen, la entrada a la cueva Waitomo, en Nueva Zelanda, que recibe al año 250 000 visitantes a pesar de su remota ubicación. Fotografía: Luis Carcavilla.

Además, como se ha comentado, es necesario asumir que el geoturismo puede ser un importante recurso para el desarrollo local, generalmente en el medio rural, que es donde suele encontrarse el patrimonio geológico.

Un buen ejemplo del potencial económico del geoturismo son las cuevas habilitadas para la visita. Se calcula que se venden anualmente 250 millones de *tickets* para acceder a alguna de estas cavidades (Cigna, 2016). Sólo en España, más de 5 millones de visitantes generan entre 45 y 50 millones de euros anuales de ingresos directos y cerca de 200 indirectos (Durán y Robledo, 2012).

En geoturismo, como en cualquier modalidad de turismo, es necesario proporcionar recursos turísticos y, en la mayoría de los casos, construir infraestructuras. El geoturismo puede enfocarse como complemento al turismo convencional masivo (Villalobos, 2001), ofreciendo nuevas opciones a zonas aledañas a grandes focos de interés, diversificando su oferta y el reparto de beneficios económicos y sociales. Además, y aunque algunos aspectos ya han sido citados anteriormente, debe estar centrado en los elementos geológicos, ya sean formas o procesos; y debe estar planificado y ser localmente beneficioso en términos socioambientales y económicos (Dowling, 2009). Así que una verdadera oferta geoturística debe referirse al interés de los lugares de atracción, pero también asegurar los servicios turísticos habituales: alojamiento, alimentación, intermediación (prestación de cualesquiera servicios susceptibles de ser demandados por los usuarios), información, guías-intérpretes y –en algunos casos– de acogida (eventos, convenciones, etcétera).

Tipologías del turismo

El éxito de una actividad geoturística requiere seguir unas pautas de organización y planificación del recurso geoturístico que identifique los lugares a visitar, el tipo de público al que se orienta, las infraestructuras y recursos interpretativos necesarios para garantizar la seguridad y el disfrute de la visita; posibles impactos derivados de la visita y medidas de corrección y seguimiento. Con respecto a los lugares de interés geológico donde centrar las actividades turísticas, Sadry (2009) identifica seis tipos diferentes:

1. Lugares de interés geológico *sensu estricto* (incluyendo, los geomorfológicos y paleontológicos).
2. Minas, ya sean antiguas (abandonadas) o activas.
3. Taludes y cortes en carreteras, vías férreas y otras infraestructuras.
4. Lugares con interés cultural y antropológico (cuevas con yacimientos arqueológicos y/o arte rupestre, minas, etc.).

5. Construcciones de piedras (arquitectura local basada en el uso de la piedra, casas excavadas en roca, etc.).

6. Lugares de interés geológico donde se desarrollen actividades de aventura.

Este listado podría ser ampliado, incluyendo otro tipo de elementos como museos, centros de interpretación, rutas (que enlazan diversos lugares de interés geológico) o incluso lugares que sean interesantes para mostrar el avance de la Geología como ciencia, como laboratorios o localidades-tipo.

Por su parte, Hose (2000) considera que pueden definirse dos tipos de lugares donde centrar las actividades geoturísticas: los primarios, que serán aquellos que con un interés geológico (ya sean expuestos natural o artificialmente) poseen un valor científico, didáctico o divulgativo; y los secundarios, que serán aquellos que posean interés por su historia, desarrollo, entendimiento, interpretación o presentación de las Ciencias de la Tierra (centros de interpretación, residencias de científicos, etc.).



Figura 4. *Glaciar Perito Moreno, Argentina, un enclave de atracción turística internacionalmente conocido. Fotografía: Luis Carcavilla.*

Lo que parece claro es que los lugares con mayor potencialidad geoturística son aquellos que poseen un alto componente estético o muestran procesos activos espectaculares. El glaciar *Perito Moreno* (Argentina) (**Figura 4**), las cataratas de Iguazú (Argentina-Brasil), el Gran Cañón del Colorado o el valle de Yosemite (EEUU) son buenos ejemplos. En estos lugares no es necesario atraer la atención del visitante, pues cualquier persona es capaz de percibir su espectacularidad y grandiosidad. Es de suponer que el simple hecho de que un visitante realice el esfuerzo físico o económico de desplazarse a uno de estos lugares y haya decidido destinar parte de sus vacaciones o tiempo libre a visitarlos implica ya una curiosidad sobre el recurso geológico en cuestión, sea esta voluntaria o quizás involuntaria o inconsciente. Precisamente por eso, porque es una demanda clara y evidente, es imprescindible aprovechar estos lugares “bandera” para transmitir información y conceptos sobre su naturaleza geológica. En el mejor de los casos, se tratará de transmitirles conocimientos específicos sobre cómo se formó ese lugar, si bien en la mayoría de los casos los visitantes no retendrán más allá de por qué ese lugar es importante (generalmente comparando con otros ejemplos nacionales o mundiales) y cómo se formó y/o funciona (en el caso de ser un proceso activo). Explicaciones que permitan entender la evolución y significado del lugar en un contexto global (paleogeográfica y temporalmente) es algo reservado a personas con una alta motivación por la geología (Carcavilla *et al.*, 2010; Meléndez-Hevia *et al.*, 2017). Sin embargo, en muchos casos no se podrá aspirar a mucho más que el público asuma que lo que ha visitado es un elemento geológico singular y relevante. Esto último no es necesariamente negativo, sino todo lo contrario: si los más de 3.5 millones de visitantes que recibe al año el Parque Nacional del Teide fueran conscientes de que lo allí visto es patrimonio geológico, constituiría, además de una excelente noticia, un gran avance en lo relativo a la concienciación, ya que estos lugares pueden producir un efecto altavoz importante para la promoción de otros no tan conocidos.

Por otro lado, hay muchos lugares que poseen un elevado interés geológico que, sin embargo, no es el rasgo protagonista que condicionan o promueven la visita. Generalmente, se trata de elementos del patrimonio natural donde la participación de la Geología no es tan evidente (p.e. humedales con fauna de interés) o manifestaciones del patrimonio histórico-artístico que utilizan rasgos geológicos como soporte o material de construcción. Algunos ejemplos son castillos, fortalezas o alcázares construidos sobre promontorios rocosos, cuevas con restos arqueológicos o pinturas rupestres, o muchos edificios monumentales en los que las rocas utilizadas para su construcción poseen particularidades interesantes.

Con respecto al tipo de público, podrían definirse dos tipos de turistas atraídos por los lugares de interés geológico: los especializados, que seleccionan intencionadamente las visitas a estos lugares con objeto de

su educación personal, mejora intelectual y disfrute; así como quienes acuden a un lugar que tiene reclamos turísticos y “se encuentran” que se basa en la presencia de un determinado elemento geológico. Ambos tipos de turistas requieren materiales y recursos diferentes. Los primeros constituyen una proporción tan baja con respecto al total, que podría afirmarse que los geoturistas, como tal, casi no existen, sino que más bien lo que hay son turistas que aprecian el valor de los lugares geológicos como una atracción más dentro de las ofertas de un determinado territorio.

Los elementos geológicos cuentan con una importante ventaja frente a otros aspectos del medio natural de cara a la organización de visitas turísticas, y es que sólo en pocas excepciones, los rasgos geológicos están siempre presentes y su visión está garantizada, frente, por ejemplo a esquivas especies de fauna de difícil observación. Además, en muchos lugares empieza a hacerse patente que cuando el público visita un enclave natural no sólo busca una flora o fauna espectacular, sino que en la mayoría de los casos demanda paisajes atractivos, tal y como demuestran numerosos estudios (Corraliza *et al.*, 2001).

Los cenotes como recurso turístico: interés natural y cultural

Se ha calculado que en la península de Yucatán hay localizados al menos 6000 cenotes (más un número indeterminado sin localizar ni explorar). Los mismos constituyen un gran patrimonio, tanto geológico, como hidrogeológico, biológico y cultural. Esa combinación de valores e intereses hace de los cenotes un recurso geoturístico de gran relevancia, pero a su vez, complejo de gestionar e incluso de caracterizar.

La riqueza geológica viene dada por el amplio desarrollo de sistemas kársticos, la mayoría formadas por una extensa red de galerías sumergidas interconectadas. Recientemente, se han conectado dos de estos sistemas, constituyendo el mayor sistema kárstico sumergido del mundo, con 347 km de galerías conectadas (Sistema Sac Actún, Tulúm). La variedad de formas kársticas y espeleotemas presentes en las cavidades (vadosos, freáticos y epifreáticos) han llamado la atención a numerosos visitantes a nivel mundial.

A nivel hidrogeológico, el subsuelo de Yucatán cuenta con unos importantes recursos hídricos conectados por una extensa red de cavidades inundadas de cerca de 2000 kilómetros de desarrollo. Se trata de un acuífero kárstico libre, costero, muy permeable y heterogéneo respecto a sus propiedades hidráulicas.

Como es conocido, también la península de Yucatán alberga una de las mayores biodiversidades del país, estando esta riqueza biológica representada en el medio subterráneo, tanto vadoso como freático.

El patrimonio cultural está también ampliamente presente en el mundo subterráneo. Por una parte, el desarrollo de la civilización maya está

ligado directamente a los recursos hídricos subterráneos, dado que no hay grandes ríos superficiales en la mayoría de la península de Yucatán. Restos de esta civilización han sido encontrados en multitud de cavidades subterráneas y especialmente bien conservados en las cuevas inundadas después de su ocupación, donde los yacimientos se han encontrado intactos. Los mayas, al igual que otros grupos mesoamericanos, creían que al morir las personas recorrían un largo camino hacia el mundo de los muertos, para ellos llamado *Xibalbá*. Este mítico lugar, donde moraban los dioses, los antepasados y demás seres sobrenaturales, se ubicaba físicamente en el subsuelo terrestre y bajo el agua, por lo que también es conocido como *inframundo*. Pero no sólo se han encontrado restos de la civilización maya, también se han encontrado restos humanos de finales del Pleistoceno y principios del Holoceno que están ayudando a reescribir la historia del poblamiento de América. Asociados a estos yacimientos o cercanos a los mismos, se han encontrado también restos óseos de fauna extinta (perezosos, mastodontes, armadillos gigantes, etc.), que confieren también un gran valor paleontológico a los sistemas subterráneos.

Actualmente la península de Yucatán y en especial el corredor turístico entre Cancún y Tulúm es conocido como la *Meca del espeleobuceo*, debido a la gran cantidad de sistemas subterráneos sumergidos ideales para el buceo en cuevas. Este auge turístico, que lleva indudables beneficios económicos a la región, también implica un riesgo de destrucción de los sitios arqueológicos sumergidos en los cenotes.

Propuestas de turismo asociadas a los cenotes

Del inventario de 3000 cenotes del estado de Yucatán realizado por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del estado (SEDUMA), se ha determinado que sólo un pequeño porcentaje está siendo explotado para uso turístico, aun cuando el Programa Estatal de Turismo de Yucatán, 2001-2007, consideró que los cenotes, sobre todo aquellos ubicados en las cercanías de las zonas arqueológicas y sitios turísticos, podían generar beneficios socioeconómicos a las comunidades locales (Hoogesteijn-Reul *et al.*, 2015). Posteriormente, tanto el Programa Sectorial de Fomento Turístico 2007-2012, como el Plan Estatal de Desarrollo 2012-2018, promocionan a los cenotes como atractivo turístico y mencionan la necesidad de “promover infraestructura turística en instalaciones y servicios en los cenotes de Yucatán”. Otros planes locales han promocionado también el uso turístico de los mismos en programas municipales, si bien no existe un programa único para toda la península, ni normativas comunes en todos los estados y municipios.

Tal como indica Ruiz Silva *et al.* (2007), la presencia de cenotes en Yucatán históricamente ha sido relevante en la forma en que la población humana se apropia y usa el territorio en el estado. De la información del Gobierno del Estado de Yucatán de 1999 a 2007 se observa que el 61% de los cenotes y grutas se ubican en predios

ejidales; el 22%, en propiedades privadas; el 9%, en terrenos comunales y, aproximadamente, el 8%, en terrenos federales, áreas de conservación o sin determinación del tipo de tenencia de la tierra. Esta distribución influye también en el posible uso turístico de los mismos y las adecuaciones para este uso. Un 46% fue clasificado como no apto para el turismo sostenible, mientras que un 25% presenta características que permiten el desarrollo de alguna actividad turística de bajo impacto.

De estas propuestas hay dos que, por diversas causas, reúnen a un atractivo turístico mayor: el Anillo de Cenotes y el eje Playa del Carmen-Tulum.

El Anillo de Cenotes

El Anillo de Cenotes es una alineación semicircular de estas formaciones que se relaciona con la teoría del impacto de un asteroide de regulares dimensiones (Meteorito de Chicxulub) que produjo un cráter de 160 kilómetros de diámetro, al chocar en lo que es hoy la península de Yucatán, que aún no emergía del mar, hace unos 65 millones de años, influyendo aparentemente en la formación de este Anillo, al fracturar las rocas de carbonato de calcio que conforman la plataforma peninsular (Poveda y Espejo, 2007). La hipótesis surge al observar la alta concentración de iridio encontrado en una delgada capa de arcilla de finales del Cretácico (marcando el límite K/T, Cretácico-Terciario) y una anomalía gravimétrica en la que se detectó la presencia de un cráter constituido por seis círculos concéntricos, de los cuales el quinto es el más visible y superficial, halladas durante los estudios realizados por la petrolera Pemex en la zona de Chicxulub. Los estudios realizados han sugerido que, a consecuencia del impacto, se dispersó una gran capa de polvo que cubrió el planeta, ocasionando un efecto similar al efecto de invernadero, que provocó la desaparición de los grandes saurios que ocupaban la tierra, así como la modificación de la flora y fauna, al cambiar la temperatura y la cantidad de luz solar incidente en la superficie de la tierra (Carreño y Montellano-Ballesteros, 1997).

Por su importancia biológica, social, cultural y económica, en 2004, el Gobierno del Estado de Yucatán inició el procedimiento para que el Anillo de Cenotes fuera reconocido como un humedal de importancia internacional dentro de la Convención Ramsar, hecho que finalmente se logró en 2009 (Sosa-Escalante y Chablé-Santos, 2013).

En 2012, las autoridades de Yucatán y el gobierno mexicano presentaron una propuesta a la UNESCO para que el Anillo de Cenotes sea considerado patrimonio mundial de la humanidad (**Figura 5**). En él se han inventariado más de 900 cenotes, si bien en la solicitud para que el anillo sea considerado patrimonio natural de la humanidad se presentó un listado de 99 de ellos, en los que destacan tres características prioritarias: a) es uno de los recursos hídricos más importantes de

México, b) es hábitat de decenas de especies de flora y fauna, y c) en más de 225 cenotes de Yucatán se han descubierto vestigios mayas, restos humanos y objetos óseos de animales con más de 10 mil años de antigüedad.

Por tanto, el interés como georrecurso está justificado: por una parte, constituye un sitio único a nivel mundial respecto a la localización de un cráter de impacto asociado al límite K/T; por otra, constituye un gran recurso hidrológico e hidrogeológico asociado con una riqueza biológica especial; asimismo, tiene un claro interés cultural tanto por los restos encontrados de la cultura maya, como los yacimientos paleontológicos de fauna extinta que alberga. Aún con esta variedad de recursos, la explotación turística de los mismos está asociada con el uso recreativo, en general como zonas de baño. En algunos de los mismos se realiza un uso deportivo de buceo en cavidades, habiéndose incrementado esta actividad en los últimos años. En concreto, la presencia de unas espeleotemas singulares en el cenote Zapote y otros cercanos, denominadas "Hell Bells" ha atraído espeleobuceadores de todo el mundo.

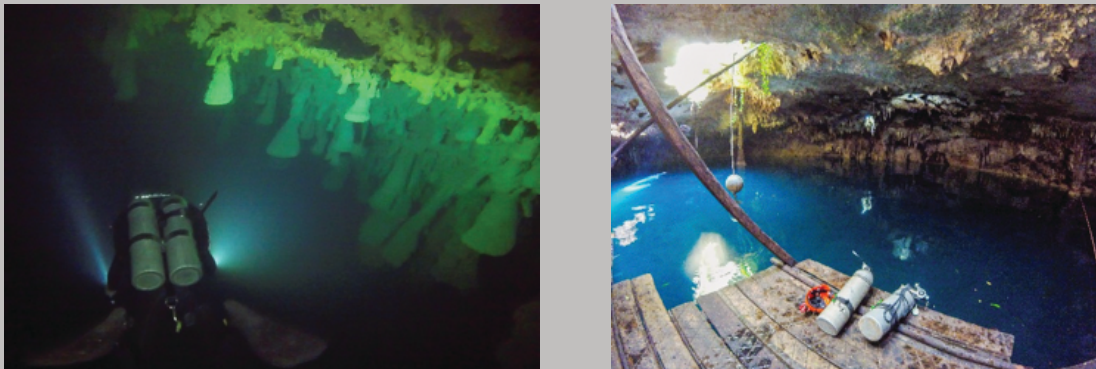


Figura 5. Anillo de Cenotes: cenote Zapote (izquierda) y las formaciones tipo "Hell Bells" que atraen a espeleobuceadores de todo el mundo. Cenote KinHa (derecha) para uso recreativo (balneario) y deportivo (espeleobuceo). Fotografías: Javier Lario.

Cenotes de Playa del Carmen-Tulúm

En el estado de Quintana Roo, el único bañado por el Mar Caribe, se construyó en 1970 la ciudad de Cancún, que en pocos años se convirtió en el primer centro turístico no sólo de México, sino de América Latina, con 4.4 millones de visitantes anuales (INEGI, 2014); que en 2017, se incrementaron hasta cerca de 16.8 millones de visitantes sólo en

Quintana Roo (SEDUMA, 2015), generando más del 30% de las divisas mexicanas (Balam, 2010). La oferta turística de Cancún se expande de manera lineal por la costa, creando el corredor Riviera Maya que hoy llega hasta Tulum, con enclaves hoteleros y nuevas ciudades turísticas como Playa del Carmen y la propia Tulum. Asociados a este eje turístico de la Riviera Maya existe un gran número de cuevas y cenotes, habiéndose documentado cerca de 350 cavidades que suman 1500 km de galerías sumergidas. Entre ellos se encuentran los sistemas kársticos sumergidos más grandes del mundo, destacando el Sistema Sac Actún con más de 350 km explorados (resultado de unir, a inicios de 2018, los sistemas Sac Actún y Dos Ojos) y el Sistema Ox Bel Ha, con 270 km explorados. Si bien las profundidades en general no superan los 25 m, en algunos de estos sistemas se alcanza -120 m (**Figura 6**). El acceso a estos sistemas sumergidos es en la mayoría de los casos a través de cenotes de diferentes tipologías. Muchos de éstos han sido adaptados en los últimos años al uso turístico.

En general, existe un uso principal para el baño y *snorkel* (buceo sin equipo autónomo), así como visitas guiadas para enseñar las cavidades y formaciones emergidas presentes en estas cavidades. Las dimensiones, la claridad de las aguas, la temperatura del agua, así como la profusión de espeleotemas en las cavidades sumergidas, ha convertido esta zona en el destino mundial para buceadores de cuevas y cavernas (espeleobuceadores), habiéndose incrementado exponencialmente la afluencia de los mismos en sus diferentes especialidades: buceadores de aguas abiertas en las zonas de cavernas (desde donde se ve la luz o hay una salida cercana) y buceadores técnicos cualificados en las galerías sumergidas.



Figura 6. Restos paleontológicos (izquierda) y arqueológicos (derecha) del sistema kárstico sumergido Sac Actún (Tulum). Fotografías: Javier Lario.

Datos de 2017 del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) indican que las zonas arqueológicas de Quintana Roo registraron 3.4 millones de visitantes (2.2 millones sólo en las ruinas arqueológicas de Tulúm), lo que representa un crecimiento del 26%, con respecto de 2016 (SEDUMA, 2017) e indica el interés creciente de los visitantes por la oferta cultural. Dentro de ésta, los cenotes de esta zona, al igual que en otros estados, no sólo tienen un interés deportivo y recreativo, sino que presentan una gran riqueza arqueológica y paleontológica.

Los sistemas kársticos sumergidos se han convertido en un lugar esencial para el estudio de las poblaciones humanas premayas, habiéndose localizado restos de diez esqueletos humanos datados entre 8000 y 13000 años de antigüedad. Todos ellos han sido clave para el estudio de los pobladores americanos tempranos, siendo la mujer de Naharon y Naia los restos humanos más antiguos de América (13000 años), planteando una llegada de los humanos a Norteamérica hace 18000 años. La normativa del INAH no permite acceder a los yacimientos arqueológicos y paleontológicos sumergidos que se están estudiando, por lo que han surgido varias propuestas museísticas para exponer los hallazgos encontrados en los mismos. En 2015, abrió sus puertas el Museo de la Prehistoria en el Ejido Jacinto Pat (Tulúm) a partir de una iniciativa privada (Instituto de la Prehistoria), con el objeto de exhibir restos arqueológicos y paleontológicos hallados en sistemas sumergidos cercanos, principalmente del Sistema Dos Ojos, así como potenciar la investigación en los mismos. Lamentablemente, a finales de 2017, el mismo ha sido cerrado por problemas de gestión. También en diciembre de 2017, la Secretaría de Cultura de México, a través del INAH, y el Gobierno del Estado de Campeche han inaugurado el Museo de Arqueología Subacuática en Campeche que, aunque no está centrado específicamente en el material localizado en los cenotes, sí dedica una parte importante a los mismos. Sería deseable una propuesta de este tipo en la zona de Tulúm, cercana a los lugares de exploración y a los yacimientos, bien con entidad propia o como una unidad asociada a este Museo. Una oferta de este tipo enriquecería sustancialmente los recursos geocientíficos asociados al turismo de esta zona.

Además de los sistemas sumergidos, existen cavidades y galerías no sumergidas asociadas con estos sistemas en los que también se pueden observar los espeleotemas e incluso restos arqueológicos, sin necesidad de realizar inmersiones. Lamentablemente, el acceso a cavidades no habilitadas es muy difícil para el particular, debido a su localización, pero hay diversas ofertas de uso turístico en algunos de estos sistemas que han sido adaptados para su visita, como por ejemplo Río Secreto (Playa del Carmen, **Figura 7**) a Aktún Chen (Akumal, Tulúm). Si bien es una realidad que se encuentran enfocados a un turismo masivo y con actividades recreativas, en algunos de estos complejos se

está apoyando la realización de trabajos científicos en estos sistemas kársticos. La ampliación de la oferta de visitas a unos recorridos con un componente más científico/cultural probablemente enriquecería mucho el conocimiento de los georrecursos de Yucatán asociados los cenotes.



Figura 7. Río Secreto (Playa del Carmen), sistema de cuevas visitable con diversos niveles de dificultad y donde se está apoyando la realización de diversos trabajos científicos de gran interés. Fotografía: Javier Lario.

Promoción del geoturismo asociado a los cenotes

Un estudio de Suárez-Arteaga (2016) para conocer cómo percibe la comunidad local el turismo asociado con los cenotes ofrece interesantes conclusiones que, con algunas limitaciones, pueden ser aplicados a otras zonas cercanas con este tipo de turismo. Un 42% de los consultados indicaron que una formación mayor en los cenotes (biología, geología, medio ambiente, cultural, etc.) ayudaría a reconocer su importancia. También un 32% indica que un turismo más controlado evitaría problemas medioambientales en los mismos (poniendo de manifiesto, por tanto, la preocupación sobre dichos problemas presentes en algunos cenotes). Un 16% piensa que el patrimonio arqueológico de Tulum son construcciones arqueológicas, evidenciando que se conoce el rico patrimonio cultural que albergan los cenotes. Lamentablemente, sólo el 10% piensa que los cenotes de Tulum están correctamente explotados. Estos resultados indican que en las comunidades hay una valoración sobre la riqueza cultural y ambiental que presentan los cenotes y su uso como recurso turístico, pero también una preocupación por la incorrecta gestión en algunos por los problemas ambientales que ésta ocasione. Igualmente, las comunidades mayas perciben que pueden estar siendo apartadas de la gestión de

los mismos, recursos que han manejado desde hace milenios, y que su patrimonio cultural puede estar también en peligro.

Las posibles alternativas propuestas en este estudio son variadas por las distintas problemáticas. Por una parte, ante la baja implicación de las comunidades indígenas en la gestión del patrimonio cultural, se propone construir políticas en las organizaciones de emprendimiento que favorezcan la relación entre comunidades indígenas/patrimonio arqueológico sumergido, detectar hitos importantes en la cultura maya local actual y realizar educación turística a través de los *tours* operadores y las comunidades mayas locales. Otro problema detectado es que a nivel municipal no existen políticas de fortalecimiento local relacionadas con la educación sobre el tema de los cenotes, proponiéndose instaurar políticas educativas, sobre el patrimonio natural y cultural de los cenotes, desarrollar talleres formativos en diferentes ámbitos tales como educación escolar, guías turísticos y administradores de zonas arqueológicas, y realizar campañas de sensibilización que promuevan el conocimiento de este patrimonio. Además, aún con las iniciativas comentadas anteriormente, son escasos los lugares de valoración y formación para los habitantes y visitantes del lugar con relación al patrimonio asociado con los mismos, siendo necesaria la apertura de espacios en los equipamientos relacionados con los mayas, tales como museos y centros de interpretación, para la formación y valoración de los mismos. Por último, también se ha observado en ciertos casos, sobre todo en áreas de gestión privada, la baja formación previa en cuestiones de patrimonio, lo que indica una necesidad de fomentar acuerdos institucionales con universidades para la capacitación de los encargados de las zonas de interés natural y cultural, así como realizar acuerdos entre distintas instituciones que permitan un intercambio de conocimiento y de gestión.

Reflexiones finales

Sin duda el geoturismo es una modalidad turística que ofrece grandes oportunidades y que puede experimentar un notable impulso en los próximos años. Sin embargo, para garantizar un geoturismo de calidad es necesario superar ciertas dificultades y afrontar ciertos retos. En primer lugar, es necesario realizar inventarios de lugares de interés geológico en los que se analice el potencial del patrimonio geológico y las tipologías que pueden identificarse. Es fundamental que en dichos inventarios de geoturismo se identifiquen las amenazas reales y potenciales derivadas de la visita del lugar, de manera que se garantice su conservación.


Otro reto importante es identificar sistemas de financiación y que el geoturismo se identifique como una realidad dentro de los foros del turismo de naturaleza, para lo cual, sin duda, es necesario ofrecer los recursos disponibles, tanto desde una perspectiva local, como mayor (*tours* operadores). Por otro lado, si se pretende que el geoturismo

realmente sea motor del desarrollo local, es recomendable que el capital que promueva el geoturismo también sea local, para que el beneficio repercuta lo más íntegramente posible en el territorio.

En este camino es necesario realizar más materiales de apoyo interpretativo que permitan a los visitantes conocer las características geológicas del lugar. Es necesario "inundar" el mercado con información geológica, al igual que proliferan las guías de setas, fauna, plantas, flores, líquenes, etc. Muchos lugares poseen un increíble potencial para la divulgación de la Geología y no son aprovechados convenientemente (Carcavilla *et al.*, en prensa). Por otro lado, también es necesario generar información geológica para que sea transmitida en lugares en los que los rasgos geológicos no son los protagonistas, pero algo pueden aportar para completar la información turística proporcionada. En este sentido, las ciudades ofrecen un potencial muy importante.

También es vital asegurar la calidad y veracidad de la información geológica suministrada al visitante. Desgraciadamente, son numerosos los casos en los que se proporciona información incorrecta, ya sea por errores en material escrito (folletos, paneles, guías, etc.) o en las explicaciones suministradas por los guías. Relacionado con esto último y con la necesaria calidad de las explicaciones, los estudiantes de ciencias de la tierra pueden tener en el futuro un campo de trabajo importante, que necesariamente deberá pasar por la dignificación de la figura del guía de campo o educador ambiental. Transmitir interés no es solamente transferir información, tiene además un componente pasional muy importante que está directamente relacionado con el conocimiento. Además, el geoturismo debe aprovechar su papel en otros tipos de turismo recreativo como el de aventura, que generalmente se realiza en ríos, cuevas o zonas montañosas, donde es posible incorporar información geológica. Sin duda, para acercar al público a la Geología, dotar de ese trasfondo geológico a la interpretación del paisaje es uno de los retos del geoturismo actual.



 *Cenote San Marcos, ubicado cerca del poblado de Sacalúm, Yucatán. En la parte de la caverna se pueden observar grandes formaciones de estalagmitas. Buzo: Manlio Cervantes. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Capítulo 9

Los cenotes como fuente de vida en la península de Yucatán: flora y fauna

Juan J. Schmitter-Soto

El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)-Chetumal



Introducción

Un vuelo en avioneta sobre la península de Yucatán nos dará la impresión de estar sobre un mar verde, un verde oscuro en el sur de vegetación alta y frondosa, un verde progresivamente más seco hacia el noroeste. Durante la travesía, con frecuencia llamará nuestra atención un brillo o incluso un rosario de espejos centelleantes. Detrás de esas luces descubriremos pequeños cuerpos de agua entre la selva: los cenotes.

Verdaderas "islas de agua" en un océano de roca caliza, en los cenotes de la península de Yucatán se encuentran especies que han evolucionado en aislamiento, algunas de ellas endémicas. Por su reducida área, no suele ser notable su diversidad biológica. Sin embargo, dada la ausencia de ríos, los cenotes son realmente una fuente de vida para la región.

Este capítulo aborda la peculiar biota de los cenotes yucatecos, con énfasis en la flora y fauna acuáticas, su composición y estructura, así como elementos de su funcionamiento ecológico y su interés biogeográfico. Es, en cierto modo, una actualización de esfuerzos de revisión realizados hace más de una década (Schmitter-Soto *et al.*, 2002; Schmitter-Soto y Salazar-Vallejo, 2003).

Microflora y hongos

La información disponible sobre bacterioplancton en cenotes indica una baja densidad y al parecer también una baja diversidad de especies. Alcocer *et al.* (1999) estudiaron cinco cenotes en Quintana Roo y encontraron una densidad de bacterias siempre menor a $5.8 \cdot 10^2$ células por milímetro de agua, las cuales implican órdenes de magnitud inferiores a la de sistemas considerados oligotróficos (Wetzel, 2001). A pesar de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación por residuos orgánicos, incluso las bacterias coliformes fecales se concentran cuando más a cinco células por mililitro (Alcocer *et al.*, 1998). Esta baja densidad se ha atribuido a la escasez de fósforo (el cual se precipita dada la concentración de carbonatos en las aguas de la península), y por lo tanto de producción primaria de origen autóctono (Alcocer *et al.*, 1999).

En el cenote anquihalino Nohoch Hol, Torres-Talamante *et al.* (2011) observaron tres morfotipos bacterianos: bacilos (80% del total), cocos y bacterias filamentosas. La concentración máxima de células se ubicó sobre la picnoclina. Schmitter-Soto *et al.* (2002) recopilaron 15 especies de cianobacterias presentes en cenotes, con mayor diversidad en las épocas de lluvias y "nortes".

Los autores consultados no hallaron bacterias quimioautótrofas, aunque se sabe que forman filamentos o tapetes en el fondo y paredes, o incluso en la haloclina; empero, Socki *et al.* (2002) encontraron en cenotes profundos del norte de la península evidencia isotópica de

sulforeducción anaeróbica bacteriana. Torres-Talamante *et al.* (2011) propusieron asimismo una posible sucesión ecológica bacteriana, dependiente de la concentración de oxígeno disuelto. Sobre la picnoclina, bajo condiciones disóxicas, habría actividad relacionada con el ciclo del azufre, por parte de colonias de *Beggiatoa* o de *Thiothrix*. Más abajo, bacterias de la familia *Rhodospirillaceae* podrían activar el ciclo del nitrógeno. Si se presenta anoxia en el fondo, el ciclo del nitrógeno podría depender de *Allochroamatium* o bacterias similares, mientras que el del azufre pasaría por *Desulfovibrio*, *Chromatium* o *Thiocapsa*.

En cuanto al fitoplancton eucarionte, los géneros *Scenedesmus* y *Cyclotella* dominan el elenco taxonómico en los cenotes. En Nohoch Hol, Torres-Talamante *et al.* (2011) identificaron clorófitas (*Chlorella* y *Monoraphidium*, además del mencionado *Scenedesmus*), bacilariofitas (la citada *Cyclotella*, así como varias especies de *Navicula* y *Nitzschia*) y cianofitas (*Chroococcus*, *Phormidium*), que se añaden a las 150 especies conocidas, de las cuales Schmitter-Soto *et al.* (2002) enlistaron tres criptofitas, 19 clorofitas (entre ellas dos especies de *Scenedesmus*: *S. circumfusus* y *S. opoliensis*), cinco crisófitas, cuatro euglenófitas, ocho pirrofitas, siete xantofitas y 40 bacilariofitas (incluida *Cyclotella meghiniana*).

En cuanto a macroalgas, Esquivel Moreno (1991) recolectó *Chara*, *Ulothrix* y *Rivularia* en la periferia de los cenotes Cuates, extremo sur de Quintana Roo; dicha carofita es común también en cenotes del litoral central (observación personal; **Figura 1**), lo mismo que la clorofita y la cianofita mencionadas. De hongos, Moreno-Pérez *et al.* (2014) aislaron 41 cepas de micromicetos de residuos vegetales sumergidos en cenotes y estudiaron su actividad antagonista contra otros hongos (fitopatógenos). Los más efectivos fueron *Hypocrea lixii* y *Rhizoctonia solani*, seguidos por *Pestalotiopsis mangiferae*.

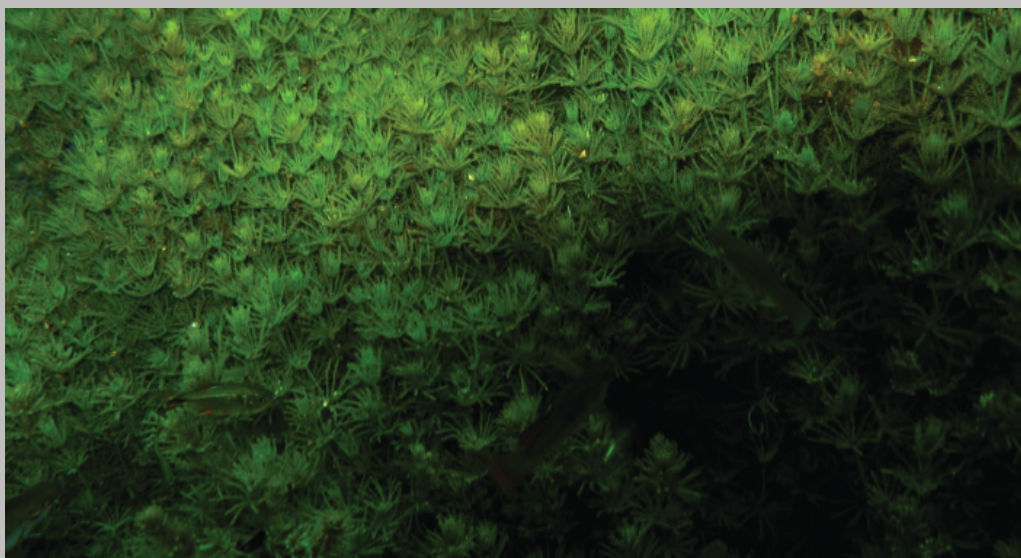


Figura 1. Alga carofita, *Chara* sp. Foto: H. Bahena.

Macroflora

Los cenotes de tierra adentro se asocian característicamente con árboles tales como diversas especies de *Ficus*, conocidos en la región como "álamos". Los cenotes más costeros suelen estar bordeados por mangle, *Rhizophora mangle* (**Figura 2**) o *Conocarpus erecta*, sobre los cuales puede crecer la liana *Rhabdadenia biflora*, así como por pastos emergentes, como la cortadera, *Cladium jamaicense*; la espadaña, *Typha domingensis*; el arbusto "juluub", *Bravaisia berlandieriana*, y el carrizo, *Phragmites australis*. En las orillas son frecuentes también helechos como *Acrostichum danaeifolium*, *Nephrolepis biserrata* o *Psilotum nudum*, las aráceas de grandes hojas *Philodendron* y *Wolffia*, la leguminosa *Sesbania herbacea*, y la palma ch'iit, *Thrinax radiata*, protegida legalmente (Gutiérrez-Báez, 2006; Herbario CICY, 2010). Los helechos mencionados a veces forman islas en el centro de los cenotes, al crecer sobre rocas caídas (Gabriel *et al.*, 2009).

Figura 2. Planta acuática flotante *Nymphaea ampla*. Al fondo, mangle rojo, *Rhizophora mangle*. Foto: H. Bahena.



Entre las plantas acuáticas que crecen en los cenotes, sobre todo cuando hay algún sustrato firme, están la "flor de agua", *Nymphaea ampla* (**Figura 2**) y *N. capensis*, *Cabomba palaeformis*, la "elodea" *Egeria densa*, el "lirio" *Vallisneria americana* (aunque estas dos últimas son más comunes en áreas de inundación aledañas al cenote, o bien, en los ojos de agua en el centro de los petenes) y cuatro especies de *Sagittaria* (no sólo una, como anotaron Schmitter-Soto *et al.*, 2002), así como las flotantes "lechugas de agua", *Spirodela polyrrhiza*, *Pistia stratiotes* y *Lemna aequinoctialis*, y en ocasiones *Eichhornia crassipes*, el lirio de agua. Son muy comunes también, sobre la vegetación ribereña, bromelias como *Aechmea* y *Tillandsia* (Herbario CICY, 2010). Gutiérrez Báez (2006) provee una lista con 51 especies de plantas estrictamente acuáticas de la península de Yucatán, en 27 géneros y 17 familias, aunque menos de la mitad de ellas se encuentran en los cenotes.

Invertebrados

Muchos *phyla* de presencia indudable en los cenotes no cuentan con literatura publicada. Por ejemplo, no es fácil localizar trabajos sobre gastrotricos, tardígrados o nemátodos de vida libre, salvo, para estos últimos, la mención de Smirnov y Elías-Gutiérrez (2011) de que son menos abundantes en los cenotes que en las lagunas, sin precisar su composición. Hoffmann *et al.* (1986) señalaron que hay en México no menos de 25 especies cavernícolas de nemátodos.

Van Hengstum *et al.* (2008) fueron los pioneros en el estudio de las amibas con teca y foraminíferos en cenotes. Descubrieron que estas comunidades, de baja diversidad, varían en función de pequeños cambios en la salinidad, del orden de décimas de ups (unidad práctica de salinidad). Hay conjuntos dominados por *Centropyxis aculeata* y *Arcella vulgaris*, otros por *C. constricta* y *Jadammina macrescens*, o bien, por *Ammonia tepida*, *Tritaxis* sp. y *Elphidium* sp. Las formas de *Centropyxis* presentan una tendencia ecofenotípica a tener menos espinas a medida que se incrementa la salinidad. Hacia las 3.5 ups hay una transición entre comunidades dominadas por amibas tecadas a otras con dominio de foraminíferos. Gabriel *et al.* (2009) han encontrado también, en el sedimento, a *Trochammina macrescens*.

Desde la aportación de Penney y Racek (1968), por décadas la única esponja conocida de cenotes yucatecos fue *Spongilla cenota*, del cenote Xtoloc en Chichén Itzá, antes considerada endémica de la península de Yucatán, pero recientemente descubierta también en La Florida (Nichols & Bonner, 2014). Empero, en un solo cenote anquihalino de Cozumel, Calderón-Gutiérrez (2013) descubrió que *Porifera* era el *phylum* más diverso, con 22 de las 71 especies de invertebrados registradas en el estudio, e incluso un probable género, familia *Agelasidae*, que sería microendémico. Otros géneros reportados allí fueron *Acarus*, *Aciculites*, *Dercitus*, *Gastrophanella*, *Geodia*, *Haliclona*, *Leiodermatium*, *Microscleroderma*, *Psammastra*, *Stelletta*, *Tethya* y *Timea*.

El citado trabajo de Calderón-Gutiérrez (2013) es notable también por dar los primeros registros de tres *phyla* en cenotes (sistema anquihalino Aerolito, Cozumel): un nemertino del género *Enopla*, un sipuncúlido y un platelminto turbelario, estos últimos no identificados. Este autor identificó además en dicha localidad dos cnidarios (géneros *Isarachnanthus* y *Corynactis*) de agua salada. Hoffmann *et al.* (1986) habían mencionado años antes la presencia infrecuente en cuevas inundadas de especies del hidrozoo dulceacuícola *Hydra*, y señalaron que en los cenotes de la península de Yucatán existen ocasionalmente plumatélidos, *phylum Ectoprocta*.

En cuanto a los moluscos, los caracoles del género *Pyrgophorus* abundan en los cenotes, sobre todo *P. coronatus*, pero también

P. marmoratus (Gabriel *et al.*, 2009). Smirnov y Elías-Gutiérrez (2011) hallaron con frecuencia bivalvos en cenotes, sin determinarlos. En el cenote T'isil, en la zona norte de Quintana Roo, Wollwage *et al.* (2012) encontraron 14 géneros de bivalvos y de gasterópodos, tanto propiamente acuáticos como habitantes de la periferia del cuerpo de agua. Entre los primeros destacan, además de *P. coronatus*, los caracoles *Ferrissa*, *Hebenetancylus*, varias especies de *Physella* y *Pomacea flagellata*, así como la almeja *Sphaerium transversum*; entre los caracoles terrestres están *Chondropoma*, *Guppya*, *Leptinaria*, *Pupisoma*, *Succinea*, *Thysanophora* y *Vertigo*. En sistemas anquihalinos de Cozumel, Calderón-Gutiérrez (2013) encontró formas marinas tales como *Cypraea*, *Hyalina*, *Isognomon* y *Lima*. Recientemente fue descrito el primer caracol endémico de estos sistemas, *Teinostoma brankovitsi* (Rubio *et al.*, 2015).

Frontana-Uribe y Solís-Weiss (2011) fueron las primeras en registrar anélidos poliquetos en cenotes mexicanos. En los sedimentos y sobre las raíces del mangle del cenote Aerolito, en la isla de Cozumel, capturaron once especies de cinco familias, de los géneros *Capitella*, *Erynaceusyllis*, *Exogone*, *Heteromastus*, *Paradoneis*, *Salvatoria*, *Stenoninereis*, y *Syllis*, además de una especie nueva de *Ophryotrocha*. Inclusive, en los túneles asociados al cenote localizaron una especie más, *Hermodice carunculata*. Calderón Gutiérrez (2013) incrementó la lista del mismo sistema, con especies de *Dorvillea*, *Harmothoe*, *Notopygos* y seis *Trypanosyllis*. Estos organismos, usualmente marinos, viven aquí en condiciones mesohalinas a euhalinas, y se sospecha una simbiosis con la esponja *Geodia neptuni*.

Se conocen unas 150 especies de rotíferos de la península de Yucatán. Sarma y Elías-Gutiérrez (1999) mencionaron sus variaciones según el estado trófico de cada embalse; la diversidad de rotíferos es menor en los cenotes que en las lagunas. *Brachyonus falcatus* sólo fue encontrado en cenotes; varias especies de *Lecane* y de *Lepadella* aparecieron, tanto en cenotes, como en otros cuerpos de agua.

Como todos los autores previos, también Szeroczyńska y Zawisza (2015) encontraron gran variación de cenote a cenote en la composición del zooplancton; los cladóceros (más propiamente, branquiópodos) fueron poco frecuentes en sus muestreos, con sólo cuatro especies, en los géneros *Alona* (con la especie endémica *A. pectinata*: Mercado-Salas *et al.* 2013), *Camptocercus*, *Ceriodaphnia* y *Oxyurella*. Sin embargo, esos registros deben sumarse a las especies previamente reportadas, en los géneros *Dunhevedia*, *Euryalona*, *Macrothrix*, *Moina*, *Moinodaphnia*, *Scapholeberis* y *Simocephalus* (Schmitter-Soto *et al.* 2002), además de *Alonella*, *Bosmina*, *Chydorus*, *Graptoleberis* y *Pleuroxus*, conocidos merced a que sus restos fueron encontrados en el fondo de varios cenotes por Smirnov y Elías-Gutiérrez (2011). Mercado-Salas *et al.* (2013) enlistaron también especies de *Acroperus*, *Diaphanosoma*,

Disparalona, *Ephemeroporus*, *Eulimnadia*, *Grimaldina*, *Guernella*, *Ilyocryptus*, *Kurzia*, *Latonopsis*, *Leptestheria*, *Leydigia*, *Leydigiopsis*, *Notoalona*, *Onchobunops*, *Picripleuroxus*, *Pseudosida*, *Sirsilatona* y *Streptocephalus*, de modo que los branquiópodos podrán ser poco frecuentes en los cenotes, pero tienen una diversidad muy llamativa.

A pesar de ser un grupo dominante en las biocenosis dulceacuícolas de la península, donde son los crustáceos más exitosos (Smirnov & Elías-Gutiérrez, 2011), sólo unas diez especies de ostrácodos se conocen de cenotes, la mayoría en el género *Cypridopsis*. Al menos dos de ellas tienen cenotes yucatecos como localidades típicas: *C. yucatanensis* y *C. niagranensis* (Furtos, 1936). La lista incluye además a la *Humphreysella mexicana* (antes en el género *Danielopolina*), cuya localidad tipo es el cenote Cristal, cerca de Tulúm, en salinidad moderada (Álvarez *et al.*, 2015), así como a *Darwinula stevensoni* y *Cytheridella ilosvayi* (Gabriel *et al.*, 2009) y a la endémica *Spelaeoecia mayan* (Mercado-Salas *et al.*, 2013).

De copépodos se han detectado unas 60 especies en cenotes de la península (Suárez-Morales y Reid, 2003), un incremento sustancial respecto de las 35 enlistadas por Schmitter-Soto *et al.* (2002), y se siguen describiendo especies nuevas, como el endémico *Stephos fernandoi* (Suárez-Morales *et al.*, 2017). Hay incluso géneros endémicos, como el espeleófrido *Mexicophria* (Boxshall *et al.*, 2014). Otros taxones incluyen a *Arctodiaptomus*, *Leptodiaptomus*, *Mastigodiaptomus* (con dos especies endémicas, *M. maya* y *M. reidae*), *Mesocyclops* y *Pseudodiaptomus*, así como *Acanthocyclops*, *Amphiascoides*, *Attheyella*, la endémica *Balinella yucatanensis*, *Cletocampus*, *Diacyclops* (con cuatro especies endémicas: *D. chakan*, *D. ecabensis*, *D. pilosus* y *D. puuc*), *Ectocyclops*, *Eucyclops*, la endémica *Exumella tsonot*, *Halicyclops* (con el endémico *H. cenoticola* *H. caneki* también es endémico de la península, pero no está en cenotes), *Homocyclops*, *Macrocyclops*, *Microcyclops* (una especie endémica, *M. echinatus*), *Neutrocyclops*, *Nitokra*, *Osphranticum*, *Paracyclops*, *Parapseudoleptomesochra*, el género endémico *Prehendocyclops*, *Prionodiaptomus*, *Schizopera* y *Thermocyclops* (Rocha *et al.*, 2000; Mercado-Salas *et al.*, 2013). Muchas especies de *Mesocyclops* tienen uso potencial para el control biológico de las larvas de mosquito; algunas son endémicas de cenotes, como *M. chaci* y *M. yutsil* (Suárez-Morales y Gutiérrez-Aguirre, 2001).

El termosbenáceo *Tulumella unidens* se encuentra sobre la haloclina en cenotes anquihalinos del área de Tulúm (Álvarez *et al.*, 2015). En contraste, el remipedio *Xibalbanus tulumensis* (anteriormente clasificado en el género *Speleonectes* **Figura 3**) el único crustáceo venenoso del mundo, se presenta a profundidades superiores a los 12 m, bajo la haloclina, es decir, en agua marina (Yager 1987; Álvarez *et al.* 2015), lo mismo que *X. fuchscockburni* (Neiber *et al.* 2012) y el

recientemente descubierto *X. cozumelensis* (Olesen *et al.*, 2017). Estos artrópodos son simpátridas en muchos cenotes, pero no sintópicos.

Figura 3. *Xibalbanus tulumensis*, crustáceo remipedio. Foto: F. Álvarez.



Dentro de los malacostracos, los misidáceos están representados por los troglobios dulceacuícolas *Antromysis cenotensis* y dos especies de *Stygiomysis*, de amplia distribución en la península. Por su parte, los anfípodos gammáridos tienen a los cosmopolitas *Hyaella azteca* y *Quadriviso lutzi*, así como a los endémicos de cenotes peninsulares *Mayaweckelia cenotocola*, *Tuluweckelia cernua* (Álvarez *et al.*, 2015), *Bahadzia bozanici* y *B. setodactylus* (Holsinger, 1992). Recientemente se describió del cenote Aerolito *Cimadusa herrerae* (Ortiz y Winfield, 2015).

Las "cochinillas", isópodos cirolánidos, tienen una distribución menos amplia. *Metacirolana mayana* (antes en el género *Bahalana*) es propia de cenotes anquihalinos de Cozumel y Tulum, a diferencia de *Creaseriella anops*, estrictamente dulceacuícola. Lo mismo que los anfípodos, los decápodos ciegos *Typhlatya* y *Creaseria*, y el pez conocido como damablancas ciegas (ver más adelante), evolucionaron sin duda a partir de poblaciones que quedaron atrás, en cuevas inundadas, al bajar el nivel del mar en el periodo Pleistoceno, y debieron adaptarse al agua dulce, o bien, a un ambiente de salinidad estratificada (Wilkens, 1982).

Entre los decápodos, Schmitter-Soto *et al.* (2002) omitieron mencionar a los átididos *Jonga serrei*, de cenotes anquihalinos de Tulum (sistema Nohoch Nah Chich), y *Typhlatya dzilamensis*, este último con una distribución muy interesante: dos cenotes en Dzilam de Bravo, bajo la haloclina (es decir, en agua de mar), y en una cueva marina a 300 m de la costa (Álvarez *et al.*, 2015). En los cenotes existen más de una docena de especies de camarones carideos (la mayoría átididos, pero también alféidos, palemónidos, hipolítidos y barbúridos), pues los citados se suman a *Agostocaris bozanici*, *Calliasmata nohochi*, *Creaseria morleyi*,

Janicea antiguensis, *Parhippolyte sterreri* (antes en el género *Somersiella*), otras tres especies de *Typhlatya*, *Barbouria yanezi* (Mejía et al., 2008), *Procambarus maya* (Mercado-Salas et al., 2013), *Farfantepeneus* sp., *Stenobermuda* sp., *Stenopus hispidus* (Calderón-Gutiérrez, 2013), *Triacanthoneus akumalensis* (Álvarez et al., 2012) y *Yagerocaris cozumel*; esta última se conocía sólo en Cozumel, pero fue recolectada hace poco en la península de Yucatán continental, en cuevas de Tulum (Álvarez et al., 2015). La especie de *Procaris* mencionada como no descrita por Iliffe (1992) corresponde a *P. mexicana*; Mejía-Ortiz et al. (2013) la compararon con otros cuatro camarones de cuevas en términos de su adaptación convergente (pero distinta en diversos grados) al medio cavernícola anquihalino.

Schmitter-Soto et al. (2002) pasaron completamente por alto a arácnidos e insectos, ya fuesen acuáticos, o bien, habitantes de las paredes del cenote. Hace 80 años, Marshall (1936) describió ácaros de agua encontrados en cenotes yucatecos: *Koenikea indistincta*, *Neumania cenotea* y *Piona pearsei*. Otros registros de hidroacarinos en estos ambientes son los de *Hydrodroma despiciens* y *Limnesia paucispina*, por la misma investigadora. Rowland y Reddell (1977) citaron al esquizómido *Schizomus portoricensis* de paredes y túneles (secos) de muchos cenotes peninsulares, y Cupul-Magaña y Shelley (2015) hicieron lo propio con el miriápodo *Prosopodesmus jacobsoni*. Por su parte, Gertsch (1977) mencionó arañas terafosas no identificadas de las paredes de cenotes, como Xtoloc y otros en Abalá, Calcehtok, Hochtún, Mayapán, Tecoh, Xtacabihá y otras localidades del estado de Yucatán, así como otras arañas, de los géneros *Eidmanella*, *Goeldia*, *Loxosceles*, *Maymena*, *Meioneta*, *Metagonia*, *Modisimus*, *Oonops*, *Scytodes*, *Theridion* y *Uloborus*; además, describió como especies nuevas a *Metagonia goodnighti* y *O. mitchelli*, con sendos cenotes como localidades tipo, e incluso un género nuevo, *Tixcocoba*, con la especie tipo *T. maya*.

En cuanto a insectos, el neuróptero *Plega yucatanae* fue descubierto en el citado cenote Xtoloc, Chichén Itzá (Parker y Stange, 1965). Además de una dominancia de tricópteros específicamente en el cenote Zací (Valladolid), Smirnov y Elías-Gutiérrez (2011) mencionaron la presencia de quironómidos ("mosquitos no picadores") en muchos cenotes, sin identificarlos. Vinogradova y Riss (2007) parecen haber sido los primeros en ofrecer un inventario formal de estos dípteros en la península; enlistaron 84 especies de 48 géneros, pero la diversidad y densidad fue mucho mayor en lagunas que en cenotes. Los géneros más abundantes fueron *Cladopelma*, *Cladotanytarsus*, *Labrundinia*, *Microtendipes*, *Natarsia*, *Tanytarsus* y *Xenochironomus*.

Solís-Marín y Laguarda-Figueras (2008) capturaron representantes de todas las clases de equinodermos, excepto crinoideos, en el sistema de cuevas del cenote Aerolito, isla de Cozumel, misma localidad donde

Mejía-Ortiz *et al.* (2007) habían logrado el primer registro mundial de un equinodermo no holoturoideo en ambientes subterráneos, y posteriormente los propios Solís-Marín y Laguarda-Figueras (2010) describirían la primera estrella de mar endémica de cuevas, *Copidaster cavernicola*. Calderón-Gutiérrez (2013) halló 16 especies del phylum en ese mismo sistema anquihalino, de los géneros de holoturias *Euapta*, de erizos *Brissopsis* y *Eucidaris*, de ofiuros *Amphipholis*, *Ophiocoma*, *Ophioderma*, *Ophiomusium* y *Ophiothrix*, y de estrellas de mar *Asterinides* y *Mithrodia*. Estos datos ubican al sitio como el ambiente hipógeo de mayor riqueza equinodermatológica del mundo. Además, el invertebrado más abundante en dicho cenote fue un equinodermo: el ofiúrido *Ophionereis cf. reticulata*.

Finalmente, por primera vez se registraron cordados primitivos (ascidias) en cenotes en el amplio estudio de Calderón-Gutiérrez (2013), con el género *Pyura*.

Vertebrados

En los cenotes de la península de Yucatán y su periferia habitan cocodrilos (*Crocodylus moreletii*), iguanas (*Ctenosaura similis*, entre otras), tortugas (*Chrysemys scripta*, *Dermatemys mawii*, *Kinosternon creaseri* (**Figura 4**), *K. leucostomum*, *K. scorpiodes*, *Rhinoclemys areolata*, etc.) y culebras, por ejemplo *Thamnophis proximus*, la cual se ha registrado en cenotes con manglar cercanos a la playa en Sian Ka'an (Calderón-Mandujano *et al.*, 2008). Hay una subespecie de la tortuga *Trachemys venusta* considerada endémica de cenotes del norte peninsular: *T. v. iversoni* (McCord *et al.*, 2010).



Figura 4. *Kinosternon creaseri*, la tortuga de pantano yucateca. Foto: R. Cedeño.

De anfibios anuros, además de diversas ranas, por ejemplo se tienen especies de *Leptodactylus* y de *Hylidae*, y el ubicuo sapo *Chaunus marinus* (antes en el género *Bufo*), hay al menos una especie descrita de cenotes: *Tripurion petasatus*, cuya localidad tipo son las paredes del cenote Tamaché, 17 km al norte de Mérida (Wiens *et al.*, 2005). *Lithobates brownorum* (antes en el género *Rana*) se ha registrado en el cenote Noh-Chocunchey, Celestún (Zaldívar-Riverón *et al.*, 2004), así como *R. pipiens* y *Smilisca baudini* en otros, cercanos a Chichén Itzá (Maslin, 1963).

La primera exploración ictiológica de los cenotes peninsulares fue obra de Hubbs (1936, 1938), quien describió las dos especies de peces yucatecos estrictamente cavernícolas: damablanca, *Typhliasina pearsei* (antes en el género *Ogilbia*), y la anguila ciega, *Ophisternon infernale*. Este autor estableció también un número de subespecies del bagre de cenote, *Rhamdia guatemalensis* ("*Rh. quelen*" para algunos autores) y de la mojarra del sureste, *Mayaheros urophthalmus* (antes en el género *Cichlasoma*; **Figura 5**), dado que ambos tienen variaciones morfológicas. La validez de estas subespecies es muy polémica. Algunas incluso se han puesto en listas rojas, dado su carácter microendémico (Williams *et al.*, 1989).



Figura 5. *Mayaheros urophthalmus*, mojarra del sureste. Foto: L.F. Martínez.

Las subespecies del bagre en cenotes tipo cueva incluyen a *Rh. g. decolor*, *Rh. g. depressa*, y *Rh. g. stygaea*, todas ellas con algún grado de reducción de los ojos y el pigmento, además de *M. u. ericymba*, cuyo rasgo más característico es tener poros sensoriales notablemente grandes en el cráneo y línea lateral. Son endémicas de cenotes abiertos *Rh. g. sacrificii*, *M. u. conchitae* (cuya localidad tipo y única conocida, un cenote en la ciudad de Mérida, se destruyó hace muchos años), *M. u. mayorum* y *M. u. zebra*. Autores recientes, como Rícan *et al.* (2016), elevaron sin mayor análisis todas las subespecies nominales de

M. urophthalmus hasta el nivel de especie, citando el análisis morfométrico de Barrientos-Medina (1999). Sin embargo, la variabilidad genética de esta mojarra en la península es baja y no presenta una estructura geográfica clara (Razo-Mendivil *et al.*, 2013), además de que no existen rasgos únicos (autapomorfias) que pudieran definir a estas variedades como especies.

La diversidad de peces en la península se incrementa de acuerdo con dos gradientes: de norte a sur, y de la costa a tierra adentro (Wilkens, 1982; Schmitter-Soto, 1998). Los cenotes más alejados del mar no se vieron afectados por las transgresiones y regresiones de éste y, con excepción de los peces cavernícolas, en general están habitados sólo por *Rh. guatemalensis* y *Gambusia yucatanana*, y en ocasiones también por *M. urophthalmus*. El bagre es un pez de hábitos más bien nocturnos, y, lo mismo que los crustáceos ciegos, pudo haber colonizado tales hábitats a través de túneles (Wilkens, 1982). Por su parte, el gupi, *G. yucatanana*, una especie pequeña y vivípara, además de tolerante a extremos de salinidad y temperatura, concebiblemente podría haber llegado mediante el arribo exitoso de una sola hembra grávida (Schmitter-Soto, 1998). La amplia distribución de *M. urophthalmus* es más difícil de explicar, máxime la virtual ausencia de divergencia genética entre sus poblaciones. Los autores mencionados consideran probable que esta mojarra haya sido introducida artificialmente en los cenotes de tierra adentro.

El moli o topote de manglar, *Poecilia orri*, es frecuente en cenotes costeros. Vázquez-Domínguez *et al.* (2009) examinaron la estructura genética de esta especie y la de *G. yucatanana* en Sian Ka'an, y encontraron que esta última no presenta patrón geográfico o ecológico alguno, mientras que *P. orri* diverge entre poblaciones de cenotes y humedales.

Los cenotes anquihalinos, a menudo asociados con caletas, presentan una gran diversidad de peces marinos eurihalinos, sobre todo (pero no exclusivamente) en etapas juveniles. Es común ver en ellos mojarras de mar (*Gerreidae*), pargos (*Lutjanidae*), gobios (*Gobiidae*), dormilones (*Eleotridae*), agujas (*Strongylura*), robalo (*Centropomus undecimalis*), macabí (*Albula vulpes*), tzotzim (*Elops smithi*), barracuda (*Sphyraena barracuda*) y sábalo (*Megalops atlanticus*), entre muchas otras especies (Schmitter-Soto, 1998). Otro habitante peculiar de los cenotes anquihalinos es la anguila americana, *Anguilla rostrata*; estos sitios son muy diferentes de los grandes ríos de Norteamérica donde transcurre su vida adulta, que culmina con el desove en el mar de los Sargazos, un ejemplo clásico de catadromía (Miller *et al.*, 2009).

Se denomina también "anguila" a una especie muy distinta, la anguila de lodo, *Ophisternon aenigmaticum*, probable ancestro de la anguila ciega del mismo género. Es más común en humedales, pero aparece también en cenotes. Igualmente, de manera ocasional y sobre repisas de piedra en la periferia es posible observar ciprinodóntidos o bolines, sobre todo

Floridichthys polyommus, aunque en algunos sitios predominan *Cyprinodon artifrons*, o bien, *Jordanella pulchra*. Los bolines son parte del componente dulceacuícola secundario (tolerante a cierta salinidad), cuya importancia en estos ambientes trasciende a los cenotes anquihalinos, pues estos peces se pueden encontrar también algo más lejos del mar. Predominan los cíclidos, como la mojarra castarrica, *Rocio octofasciata* (antes en el género *Archocentrus*), la mojarra paleta, *Vieja melanura* (antes llamada *Cichlasoma synspilum*), la multicitada *M. urophthalmus*, la bocona *Petenia splendida*, o el boca de fuego *Thorichthys meeki*. También son frecuentes y abundantes los pecílidos; además de los ya reseñados *G. yucatanana* y *P. orri*, se encuentran *Pseudoxiphophorus bimaculatus* (antes en el género *Heterandria*), *Poecilia mexicana*, y el moli de vela, *P. velifera*. Este último se enlista en la NOM como vulnerable: es endémico del norte de la península. Otra especie endémica de esa área es la mojarra de Leona Vicario, *R. gemmata*, cuya localidad tipo, de hecho, es un cenote (Schmitter-Soto, 2007).

En los ambientes de tipo intermedio entre los cenotes más alejados del mar y los costeros de salinidad elevada, las especies dominantes son las sardinitas carácidas del género *Astyanax*. Su taxonomía está en plena revolución. Los autores más tradicionales todavía las llaman *A. fasciatus* (e.g., Wilkens 1982). Propuestas más recientes (e.g., Miller et al. 2009) rescatan una subespecie de Hubbs (1936) y la elevan a nivel específico como *A. altior*, la cual es una más de las especies endémicas del norte de la península. Schmitter-Soto (2017) reconoció *A. altior* y distinguió también otras dos especies, una en la vertiente del Golfo de México (*A. angustifrons*), la otra en la del Caribe hasta Belice (*A. bacalarensis*; **Figura 6**).



Figura 6. *Astyanax bacalarensis*, la sardinita de Bacalar (en primer plano; al fondo, hembras de *Poecilia mexicana*).
Foto: L.F. Martínez.

Al margen del debate taxonómico, las presencias y ausencias de *Astyanax* en los cenotes son enigmáticas. Si bien se trata de un pez dulceacuícola primario, es decir, intolerante a la salinidad, en casos excepcionales, como el cenote de Xcacel, se les encuentra hasta a 7 ups. Sin embargo, su ausencia conspicua en algunos otros cenotes, por ejemplo, el cenote Azul de Bacalar, podría explicarse si en algún momento de sequía en el pasado las aguas de dicho embalse hubiesen rebasado la salinidad máxima tolerable para la especie (H. Wilkens, comunicación personal).

Camargo-Guerra *et al.* (2013) describieron la variación de la comunidad de peces en cuatro cenotes costeros de la reserva de la biósfera Sian Ka'an: hubo mayor diferencia entre cenotes que entre estaciones del año o entre los cuatro años que duró el estudio. Los cenotes resultaron ser hábitats más estables que los humedales circundantes.

Muchas aves (característicamente golondrinas) y murciélagos habitan en las paredes y árboles aledaños a los cenotes. La presencia de agua en el paisaje hace una notable diferencia, al menos en lo tocante a los quirópteros. MacSwiney *et al.* (2007, 2009) demostraron que hay mayor diversidad de murciélagos insectívoros en paisajes con cenotes que sin éstos, y de ellos *Chrotopterus auritus*, *Eptesicus furinalis*, *Micronycteris schmidtorum*, *Pteronotus personatus* y un molósido no identificado fueron exclusivos de cenotes. Dieciséis especies de quirópteros se alimentan en estos ambientes.

Funcionamiento ecológico

Los cenotes han sido considerados ecosistemas heterotróficos (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Sin embargo, el balance entre la energía producida *in situ* (por vegetación de fondo, fitoplancton, o bien, por vías quimioautótrofas) depende del flujo de agua del cenote, así como del tamaño de su boca, características que permitirán la entrada en mayor o menor grado de materia orgánica terrestre procedente del área circundante por lixiviación de suelos o arrastre de troncos, hojas, deyecciones y restos de animales, sobre todo en temporada de lluvias. Otra ruta es a través de la captura de insectos, una presa favorita de los peces de cenote (Camargo-Guerra *et al.*, 2013), y la depredación de los peces por aves es una vía de exportación de energía. La abertura del cenote también influye sobre la producción autóctona fotosintética, debido a la cantidad variable de luz solar que llega al agua. Asimismo, hay que considerar que los cenotes anquihalinos son sistemas meromícticos (Alcocer, 2017), con capas de agua de diferente salinidad, una "flotando" sobre la otra, a menudo con muy poca interacción entre sí.

La materia orgánica que entra al cenote no es fácil de descomponer; incluye celulosa y quitina, sustancias de muy lenta degradación. Con todo, troncos y exoesqueletos acaban por disolverse al cabo y pueden ser aprovechados por las bacterias mencionadas al inicio del apartado

Microflora. Esto ocurre en todas las superficies del cenote, paredes y también el fondo, si éste es accesible; también puede tener lugar en la picnoclina y, en general, en toda la columna de agua, o bien, en el caso de las partículas de mayor tamaño, a través del aprovechamiento del detritus. La ruta del detritus es la que lleva energía a los túneles inundados más allá del cuerpo abierto del cenote.

Los cenotes de régimen lótico, con aguas transparentes, tienen un flujo de agua continuo, y su producción autóctona por fotosíntesis es menor, debido a que el fósforo no está disponible en el agua, por la precipitación explicada con anterioridad. Los cenotes donde no hay flujo, cuyos conductos subterráneos se han obliterado por depositación de sedimento (lénticos), tienden a presentar mayor concentración de nutrientes; esta fertilización permite florecimientos fitoplácticos y de cianobacterias, que pueden dar al agua un color verde brillante, aunque en lo profundo, en el hipolimnion y el sedimento, puede haber bacterias púrpuras anaeróbicas, que dan al cenote otro aspecto y otro funcionamiento ecológico (Schmitter-Soto *et al.*, 2002). Brankovits *et al.* (2014) encontraron evidencia de ecosistemas basados en metano en cenotes anquihalinos.

Las redes tróficas en los cenotes se han examinado por análisis de contenido estomacal y por isotopía estable. Tienden a ser simples, con pocos niveles tróficos y un eficiente paso de la energía entre dichos niveles. El origen de la energía, como se ha mencionado, es tanto autóctono como alóctono, y en el primer caso puede ser por fotosíntesis o por quimiosíntesis. La mayoría de las especies son generalistas. La materia vegetal y el detritus sostienen principalmente a distintas especies de crustáceos, consumidores primarios, que se especializan en procesar materia orgánica de fuentes diferentes, con lo cual llevan a cabo un reparto de nicho (Escobar-Briones y Machaín, 2005). Estos organismos son presa de *Astyanax* y otros peces, los cuales a su vez son depredados por peces mayores, incluido el bagre, *Rh. guatemalensis*, caso notable, pues la especie tiende en otros hábitats a ser omnívoro o detritívoro, más que el depredador tope de su pequeña comunidad (Navarro-Mendoza inédito; Schmitter-Soto *et al.*, 2002).

Se ha estudiado también la ecología trófica de los cenotes en una perspectiva histórica (de cientos a miles de años), gracias al análisis de núcleos de sedimento. Gabriel *et al.* (2009) documentaron en cenotes anquihalinos de Tulúm un cambio en las proporciones isotópicas ($^{13}\text{C}_{\text{org}}$), el cual implica una influencia cada vez mayor de la materia particulada autóctona, cuando antes era dominante el carbono proveniente de la vegetación circundante, a lo largo de la transgresión marina (elevación del nivel del mar) del Holoceno.

Biogeografía

Es clásica la subdivisión biogeográfica de la península en sus regiones norte y sur (e.g., Udvardy, 1975). Esa frontera imaginaria, aproximadamente siguiendo la Sierrita de Ticul, prolongada para llegar de Tulúm a la Ciudad de Campeche, divide un norte seco de un sur más lluvioso, y podría considerarse un punto arbitrario en un gradiente continuo. Sin embargo, muchas especies cenotícolas tienen allí, en efecto, un límite nítido de distribución. Por ejemplo, el moli de vela endémico del norte de la península, *Poecilia velifera*, se ve sustituido al sur de la línea mencionada por una especie similar, *P. kykesis* (Schmitter-Soto, 1998). Del gupi, *Gambusia yucatanana*, se han descrito dos subespecies, *G. y. yucatanana* en el norte y *G. y. australis* en el sur (Pérez-León y Schmitter-Soto, 2007). Otro ejemplo son los ya citados endemismos de *Astyanax altior* y *Rocio gemmata* en el norte, derivados a partir de posibles ancestros en el sur.

El “escalón” Tulúm-Ticul-Campeche, la vieja frontera propuesta por Udvardy (1975) se refleja también en cambios abruptos de abundancias. Un análisis de agrupamiento (Schmitter-Soto, 1999) permitió distinguir conjuntos o asociaciones de especies de peces características al sur y al norte de dicho parteaguas. Por ejemplo, *Vieja melanura* se vuelve muy escaso al norte de esa línea, mientras que con *Mayaheros urophthalmus* ocurre lo contrario hacia el sur. Schmitter-Soto y Salazar-Vallejo (2003) discuten, de manera especulativa, cómo pudo haber funcionado esta barrera o filtro.

Otra tendencia, más interesante si cabe, es la presencia de especies hermanas en la península de Yucatán y la de Florida. Los tres ciprinodóntidos peninsulares entran en ese escenario, pues cada uno tiene su pariente más cercano en la otra península: *Cyprinodon artifrons* vs. *C. variegatus*, *Floridichthys polyommus* vs. *F. carpio*, *Jordanella pulchra* (antes en el género *Garmanella*) vs. *J. flondae*; también el par de molis de vela *P. velifera* + *P. kykesis* tienen una contraparte floridana, *P. latipinna*. Estos casos hablan de una relación Florida-península de Yucatán no del todo elucidada, pero que podría reflejar la distribución relictual de los manglares, antes más continua a lo largo del Golfo de México (Schmitter-Soto y Salazar-Vallejo, 2003).

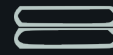
El tercer patrón notorio en la ictiofauna peninsular, el empobrecimiento a medida que los cenotes se ubican más lejos de la costa, fue comentado líneas arriba, y explicado de manera muy verosímil por Wilkens (1982). Menos sencilla de explicar es la biogeografía de los peces de agua dulce en cenotes insulares de Cozumel. La mayoría de las especies observadas en la isla son capaces de vivir en agua de mar, al menos por tiempos cortos, pero hay excepciones conspicuas, como *Ps. bimaculatus*. La presencia en Cozumel de esta especie, que no tolera agua salada, es muy peculiar. Como se discutió en su momento, los huracanes se han invocado como un posible factor de colonización de

Gambusia en los cenotes de tierra adentro; no obstante, esta hipótesis mal podría aplicarse a la colonización de las islas, pues ésta iría en sentido contrario a la trayectoria habitual de los ciclones (de este a oeste).

Igual que en el caso de *M. urophthalmus* mencionado en apartados previos, los análisis genéticos de especies de cenote no han arrojado mucha luz sobre su biogeografía. Se estudió, por ejemplo, al camarón *Typhlatya mitchelli* con tres genes mitocondriales y uno nuclear; no hay mayor divergencia entre sus poblaciones. Más que una colonización reciente, una posible explicación es que los cenotes están bien comunicados por una intrincada red de túneles (Escobar Briones y Machaín, 2005), lo cual también explicaría la distribución de los peces ciegos y del bagre en cenotes tierra adentro.



Cenote Kakirixché, ubicado en el municipio de Abalá. En su interior cuenta con una caverna a 50 metros de profundidad, con amplias galerías subacuáticas. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.



Capítulo 10

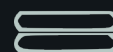
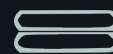
Peces de los cenotes de Yucatán

Alfredo Gallardo-Torres,¹ Maribel Badillo-Alemán,¹

Xavier Chiappa-Carrara²

¹Laboratorio de Biología de la Conservación, Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación, Sede Parque Científico. Facultad de Ciencias, UNAM

²Escuela Nacional de Estudios Superiores, unidad Mérida, UNAM



Introducción

La península de Yucatán es una de las 15 zonas fisiográficas de México, con una extensión de 39340 km², representa el 2% del territorio nacional (Beddows *et al.*, 2008). A grandes rasgos, es una amplia planicie calcárea, presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano en la mayor parte de su territorio, con una temperatura media anual de 26 °C. Casi la totalidad de su línea de costa está ocupada por manglares y, en ésta, se presenta una gran zona de humedales, además de algunas lagunas costeras. Asimismo, la naturaleza kárstica del terreno del estado de Yucatán favorece que en su superficie se presenten abundantes cenotes y aguadas, muchos de ellos costeros.

Si hay algún rasgo que distinga a Yucatán, ése es la presencia de los cenotes. Los cenotes (del maya *ts'ono'ot* o *d'zonot*: caverna con agua) son sistemas acuáticos cuyo origen puede explicarse, de manera simplificada, por la disolución de la roca caliza al contacto con el ácido carbónico y por el paso de las aguas subterráneas. Una explicación detallada del proceso de formación de los cenotes puede encontrarse en Schmitter-Soto *et al.* (2002a). De manera general, el término cenote denota cualquier espacio subterráneo con agua, con la única condición de que esté abierto al exterior en algún grado (Schmitter-Soto *et al.*, 2002b). Se estima que hay entre 7000 y 8000 cenotes tan sólo en el estado de Yucatán. Históricamente, los cenotes han tenido una gran importancia en el desarrollo de las comunidades mayas ya que, al no existir ríos superficiales en la península, en muchas ocasiones fueron la única fuente de agua dulce para su subsistencia. De ahí que se les considerara como lugares sagrados, e incluso como puerta de entrada al inframundo.

Otra de las características notables del paisaje costero de la península de Yucatán es la presencia de *islas* de vegetación, inmersas en las ciénagas pantanosas de la península. Estos ecosistemas son comúnmente conocidos como petenes (palabra de origen maya que significa "campos llanos levantados" [Tun-Dzul *et al.*, 2010]). Estas islas de vegetación arbórea generalmente se desarrollan alrededor de manantiales o cenotes costeros, por lo que dependen de estos afloramientos de agua dulce para su supervivencia.

Para los fines de este trabajo y siguiendo de manera general la clasificación de los cenotes de Navarro-Mendoza (1988) para la vertiente caribeña de la península, podemos considerar la existencia de dos tipos de cenotes en Yucatán:

- 1) Cenotes del interior, que son aquellos que se encuentran alejados de la costa y que pertenecen a cualquiera de los tipos propuestos por Hall (1936): cenotes-cántaro (*ch'é'n*), cuya abertura al exterior es reducida,

cenotes cilíndricos (*ts'onot*) de paredes verticales, donde la abertura equivale al diámetro del cuerpo de agua, cenotes aguada (*ak'al che'*), azolvados, con perfil en forma de plato y grutas (*aktun*), en los que la entrada es lateral.

2) Cenotes costeros, que, como su nombre lo indica, son aquellos que se encuentran cerca de la costa y están asociados con las zonas pantanosas y los petenes. Son abiertos y, por lo general, tienen forma circular u ovalada, con un tamaño variable.

Ictiofauna de los cenotes y cenotes costeros

Tanto los cenotes del interior del estado como los cenotes costeros son sistemas sumamente importantes por el vasto conjunto de servicios ambientales que prestan (por ejemplo, captura de carbono, sitios de crianza y reproducción de especies, sitios de ecoturismo, etc.). De forma sobresaliente, éstos son ambientes propicios para que los peces puedan vivir en ellos y constituir un componente fundamental de dichos ecosistemas.

Los peces que habitan en estos lugares presentan adaptaciones que les permiten tolerar las características particulares de estos ecosistemas y, por ello, varias especies son endémicas de la península. Sólo en el estado de Yucatán se han registrado cerca de 600 especies diferentes de peces, de las cuales algunas utilizan los cenotes y cenotes costeros para vivir o pasar al menos alguna etapa de su vida. Chumba-Segura *et al.* (2010) estimaron que en la península de Yucatán habitan 23 especies nativas de peces de agua dulce, divididas en 14 géneros y seis familias. Siendo las más representativas las familias *Cichlidae* y *Poeciliidae*, con 11 y 6 especies, respectivamente.

Puede decirse que la ictiofauna de los cenotes costeros es más diversa que la de los cenotes que se encuentran en el interior del estado ya que, como lo explican Suárez-Morales y Rivera-Arriaga (1998), la cercanía con la zona costera favorece la presencia de formas marinas y eurihalinas. Además, las características morfológicas e hidrodinámicas de los cenotes y manantiales costeros de Yucatán permiten que el agua salada que penetra desde el mar desplace, en ocasiones, al agua dulce. Se ha documentado que, en ciertos momentos, estos sistemas pueden verter agua salobre o francamente salina (Alcocer, 2017) lo que favorece la presencia de especies que se dispersan desde la zona marina. Asimismo, como la franja costera emergió tiempo después que la parte central de la península, en estos cuerpos de agua están mejor representados los organismos cuyo origen es marino (Suárez-Morales y Rivera-Arriaga, 1998).

Dado que en los cenotes del interior habitan especies de peces netamente dulceacuícolas, la diversidad íctica es menor a la que se ha registrado en los cenotes costeros. Las especies características de los cenotes del interior de Yucatán son: *Rhamdia guatemalensis* (Günther, 1864), *Gambusia yucatanana* (Regan, 1914), *Poecilia velífera* (Regan, 1914), *Ophisternon infernale* (Hubbs, 1936) y *Typhlias pearsei* (Hubbs, 1938). Vale la pena destacar que las dos últimas especies (*O. infernale* y *T. pearsei*) son especies troglobias, que carecen de coloración y han perdido los ojos.

Entre las especies de peces que habitan en los cenotes de Yucatán, de acuerdo con los criterios de la lista roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés), destacan tres especies que se encuentran *en peligro* (*M. colei*, *F. persimilis* y *O. infernale*) y dos *vulnerables* (*F. grandissimus* y *T. pearsei*). Estas especies se consideran frágiles por su limitada distribución (todas son endémicas de la península de Yucatán, e incluso, algunas sólo se encuentran en una limitada franja del estado de Yucatán) y poblaciones poco abundantes. Otras nueve especies están en la categoría de *preocupación menor* y el resto no ha sido evaluado, por lo que no hay suficientes datos para categorizarlas como *amenazadas* (**Tabla 1; Figura 1**).

Entre las principales amenazas que enfrentan los peces que habitan en los cenotes costeros se encuentran la degradación y pérdida del hábitat debida al desarrollo cercano a las costas. No menos importante es la contaminación de los mantos acuíferos por sustancias autóctonas y alóctonas. Asimismo, los peces de los cenotes del interior están amenazados, tanto por la contaminación del acuífero, como por la falta de planes de manejo que conducen a la extracción excesiva de agua, a sobrepasar los límites de carga de visitantes que realizan actividades turísticas, e incluso, en ocasiones, porque su hábitat es usado como basurero. En trabajos como el de Cervantes-Martínez y Coronado Álvarez (2007) se propone evaluar el potencial pesquero de los cenotes. Será importante considerar que cualquier actividad desregulada que conlleve a la degradación de estos ecosistemas constituye un serio problema para la sobrevivencia de la ictiofauna en estos sistemas (Ceballos *et al.*, 2016).

Tabla 1. Especies de peces características de los cenotes del interior y de los cenotes costeros. Se muestra el estatus de conservación de acuerdo con la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN).

Peces de los cenotes interior	Estatus	Peces de los cenotes costeros	Estatus
<i>Typhlias pearsei</i>	Vulnerable	<i>Poecilia velifera</i>	No evaluada
<i>Ophisternon infernale</i>	En peligro	<i>Poecilia mexicana</i>	No evaluada
<i>Rhamdia guatemalensis</i>	No evaluada	<i>Gambusia yucatanana</i>	No evaluada
<i>Poecilia velifera</i>	No evaluada	<i>Astyanax altior</i>	No evaluada
<i>Gambusia yucatanana</i>	No evaluada	<i>Astyanax aeneus</i>	No evaluada
		<i>Rhamdia guatemalensis</i>	No evaluada
		<i>Lucania parva</i>	Preocupación menor
		<i>Floridichthys polyommus</i>	Preocupación menor
		<i>Jordanella pulchra</i>	No evaluada
		<i>Cyprinodon artifrons</i>	Preocupación menor
		<i>Belonesox belizanus</i>	No evaluada
		<i>Heterandria bimaculata</i>	No evaluada
		<i>Kryptolebias marmoratus</i>	Preocupación menor
		<i>Cynodonichthys tenuis</i>	No evaluada
		<i>Menidia colei</i>	En peligro
		<i>Fundulus grandissimus</i>	Vulnerable
		<i>Fundulus persimilis</i>	En peligro
		<i>Mayaheros urophthalmum</i>	No evaluada
		<i>Rocio octofasciata</i>	No evaluada
		<i>Thorichtys meeki</i>	No evaluada
		<i>Parachromis friedrichsthalii</i>	Preocupación menor
		<i>Dormitator maculatus</i>	Preocupación menor
		<i>Ophisternon aenigmaticum</i>	No evaluada
		<i>Strongylura notata</i>	Preocupación menor
		<i>Sphyraena barracuda</i>	Preocupación menor
		<i>Lutjanus griseus</i>	Preocupación menor

Astyanax altior Hubbs 1936 ▲

Sardinita yucateca Yucatan Tetra

De 22 a 25 radios en la aleta anal y cuerpo más alto que *A. aeneus*.



*Endémica



Astyanax aeneus (Günther 1860)

Pepesca Banded Tetra ▲

De 25 a 28 radios en la aleta anal.

Menidia colei Hubbs 1936 ▲

Plateadito de Progreso
Golden Silverside

De 8 a 12 radios en la aleta anal.



*Endémica



Rhamdia guatemalensis (Günther 1864) ▲

Juil descolorido, bagre South American Catfish

Cuerpo sin escamas, aleta adiposa más larga que alta, con dos pares de barbillas mandibulares y un par de barbillas maxilares más largas.



*Endémica



Fundulus grandissimus Hubbs 1936 ▲

Sardinilla gigante Giant Killifish

Cuerpo sin barras verticales, más grande y robusto que *F. persimilis*.



*Endémica



Fundulus persimilis Miller 1955 ▲

Sardinilla yucateca Yucatan Killifish

Cuerpo con barras verticales, los machos tienen mayor pigmentación en las aletas dorsal y anal que las hembras.

Lucania parva (Baird & Girard 1855)

Bolín, sardinilla de lluvia ▲

Rainwater Killifish

Parte anterior de la aleta dorsal con una mancha vertical oval de color negro.



*Endémica



Floridichthys polyommus Hubbs 1936 ▲

Bolín yucateco Ocellated Killifish

Cuerpo corto, robusto y alto, con bandas angostas y ocelos de color dorado en el cuerpo. Los machos tienen las aletas más desarrolladas y coloridas que las hembras.



Jordanella pulchra (Hubbs 1936) ▲

Cachorrillo de Progreso Yucatan Flagfish

Con una barra negra en el ojo y un punto negro en el costado.



*Endémica



Cyprinodon artifrons Hubbs 1936 ▲

Bolín petota Yucatan Pupfish

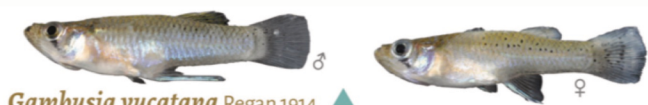
Con bandas irregulares, pero nítidas en los costados. Con un ocelo de color negro sobre la aleta dorsal que es más marcado en las hembras.



Belonesox belizanus Kner 1860 ▲

Picudito Top Minnow

Cuerpo alargado y fino, boca prominente a manera de pico con numerosos dientes.



Gambusia yucatanana Regan 1914 ▲

Guayacón yucateco Yucatan Gambusia

Origen de la aleta dorsal por detrás de la anal. Hileras de puntos en la aleta caudal y línea oscura en el ojo



Poecilia velifera Regan 1914 ▲

Abanderado Sailfin Molly

Machos con aleta dorsal muy grande. Tanto machos como hembras con mayor altura que otras especies de poecílicos.



Poecilia mexicana Steindachner 1863 ▲

Shortfin Molly

Cuerpo menos robusto y alto que *P. velifera*, aleta dorsal no muy alta, aleta caudal redondeada. Aleta dorsal detrás de la pélvica.



Heterandria bimaculata (Heckel 1848) ▲

Guatopote manchado Twospot Livebearer

Con una mancha negra redondeada en la base de la aleta caudal, cercana a la línea media lateral.

Mayaheros urophthalmum ▲

(Günther 1862)

Mojarra castarrica

Mexican Mojarra

Con cinco a siete barras verticales y un ocelo negro en la base de la aleta caudal.



Rocio octofasciata (Regan 1903)

Mojarra castarrica ▲

Jack Dempsey

Con marcas azules iridiscentes y puntos aperlados. Un ocelo caudal.

Thorichthys meeki Brind 1918 ▲

Mojarra boca de fuego

Firemouth Cichlid

Coloración rojo intenso en garganta y vientre cuando esta vivo. Con mancha subopercular prominente y oscura.



Dormitator maculatus (Bloch 1792) ▲

Guavina Fat Slepper

De color café a negro, con una mancha azul sobre la base de la aleta pectoral.

Ophisternon aenigmaticum ▲

Rosen & Greenwood 1976

Anguila de pantano

Obscure Swamp Eel

Cuerpo anguiliforme de color gris. Los ojos son pequeños y pueden quedar cubiertos por la piel.



Clave

Categoría de riesgo IUCN: ▲

En peligro

▲

Vulnerable

▲

Preocupación menor

▲

No evaluada

Figura 1. Peces de los cenotes costeros de Yucatán (tomado de Gallardo-Torres et al., 2017).



Cenote Sabak Há, ubicado en la cercanía del poblado de Sacalúm. Este cenote tiene la particularidad de ser, hasta hoy, el de mayor profundidad en el estado y es considerado uno de los más impresionantes que tiene Yucatán. Buzos: Erik Garmendia, Cristian Selun y Addy Alcocer. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.

Capítulo 11

Contaminación y su efecto en peces de cenotes de Yucatán

Gabriela Rodríguez-Fuentes y Elsa Noreña-Barroso

Unidad de Química Sisal-UNAM



Introducción

La península de Yucatán es una planicie de naturaleza kárstica en el sureste de México. Los cuerpos de agua superficial y los ríos son escasos o simplemente no existen. El agua subterránea es la principal fuente para consumo humano, así como para ser usada en actividades agrícolas e industriales (Doehring y Butler, 1974; Escolero *et al.*, 2000; Escolero *et al.*, 2002; Perry *et al.*, 2002). Una característica de la Península, especialmente en el norte, es la presencia de cenotes. Los cenotes (del maya *d'zonot*) son cuerpos de agua formados por la disolución de piedra caliza por ácido carbónico y son el único signo visible del distintivo sistema acuático subterráneo en la península de Yucatán (Cervantes-Martínez *et al.*, 2002).

Las zonas kársticas en Yucatán son muy permeables y son altamente susceptibles a la contaminación de los acuíferos (Doehring y Butler, 1974; Marin y Perry, 1994; Pacheco y Cabrera, 1996; Pacheco *et al.*, 2000; Escolero *et al.*, 2002). Muchos estudios han sido conducidos para evaluar la calidad del agua subterránea, desde diferentes puntos de vista (Delgado *et al.*, 2010). Sin embargo, los estudios sobre la presencia de contaminantes orgánicos y su riesgo para el ecosistema en esta zona son prácticamente inexistentes.

El término "ecotoxicología" fue primeramente utilizado por el profesor Truhaut, en 1977, quien la definió como la rama de la toxicología que estudia el efecto de los contaminantes en los componentes de un ecosistema, en un contexto integrado (Truhaut, 1977). A pesar de que el término se empezó a utilizar por esas fechas, los esfuerzos de los investigadores para determinar y cuantificar el efecto que ciertos contaminantes tenían sobre los ecosistemas ya era existente. Resulta muy difícil relacionar las concentraciones encontradas en el agua con el efecto que tienen en los organismos y determinar si constituyen un riesgo ambiental. Por lo tanto, es necesario emplear otras herramientas que ayuden a determinar la concentración y la interrelación entre los diferentes compuestos, así como su capacidad de introducirse, transformarse o acumularse en los organismos, lo cual será la diferencia en constituir o no un riesgo para la salud de los ecosistemas. Uno de los mejores mecanismos para evaluar la biodisponibilidad de los contaminantes es mediante el uso de biomarcadores que toman en cuenta los procesos de absorción y distribución, así como del metabolismo que ocurre en los organismos. Los biomarcadores son respuestas biológicas cuantificables que cambian como respuesta a la exposición a un compuesto xenobiótico u otra perturbación ambiental o fisiológica y que pueden ser indicadores de una exposición o efecto a un compuesto tóxico (Chambers *et al.*, 2002). Si los biomarcadores son suficientemente específicos y bien caracterizados, éstos pueden ser de gran utilidad en la evaluación de riesgo, proporcionando información del grado de exposición de los humanos o poblaciones naturales a un

xenobiótico específico o a una mezcla de ellos. El efecto de los contaminantes se puede determinar a varios niveles de organización, desde nivel subcelular hasta poblaciones y comunidades. Sin embargo, y con excepción de pocos contaminantes, todos los efectos tóxicos inician con la interacción con una o más biomoléculas y de ahí van escalando hasta llegar a afectar a los ecosistemas. Por lo tanto, el entender los efectos a nivel bioquímico puede proporcionar importante información del origen de los efectos vistos a niveles más complejos (Newman, 1998). Los biomarcadores a nivel subcelular más utilizados corresponden a la cuantificación de enzimas de biotransformación, parámetros de estrés oxidante, proteínas de estrés y resistencia multixenobiótica, así como parámetros hematológicos, inmunológicos, reproductivos y neurológicos.

Los peces cebra (*Danio rerio*) enjaulados

El uso de biomarcadores de efecto en organismos enjaulados es útil para conocer la calidad de agua de una zona específica, se basa en el uso de organismos que se llevan del laboratorio y se les coloca en diferentes cuerpos de agua durante un tiempo determinado y se analizan sus respuestas fisiológicas a contaminantes para detectar la presencia de compuestos tóxicos en el agua. La selección del organismo con el que se va a realizar la exposición es sumamente importante y, por lo general, se eligen organismos nativos de los cuerpos de agua a estudiar. Sin embargo, en el caso de la península de Yucatán, la información de biología reproductiva, fisiología y metabolismo de contaminantes en los peces que habitan los cuerpos de agua es limitada. Esto impide obtener organismos en el número y talla necesarios para este tipo de estudios. El pez cebra (*Danio rerio*) (**Figura 1**) ha surgido como un modelo de vertebrado y ha sido empleado en estudios de genética, desarrollo embrionario y toxicología acuática; más recientemente como un modelo para enfermedades humanas y el estudio de drogas terapéuticas (Penberthy *et al.*, 2002; Sumanasa y Lin, 2004). Este organismo presenta una gran cantidad de atributos favorables, incluyendo su pequeño tamaño, su rápido desarrollo, su transparencia óptica durante estadios temprano de desarrollo y similitud genética a los humanos (Lammason *et al.*, 2005), lo cual lo hace un organismo ideal para estudios de toxicología acuática.



Figura 1. Pez cebra (*Danio rerio*) utilizado como organismo bioindicador.

Para el presente estudio se seleccionó como biomarcadores la expresión de los genes de citocromo P-450 1A (CYP1A) y vitelogenina (VTG) (Rodríguez-Fuentes *et al.*, 2010; Rodríguez-Fuentes *et al.*, 2012). En peces, la clase de isoenzimas que son responsables de la biotransformación de una gran cantidad de compuestos xenobióticos (PAH, PCB, dioxinas, etc.) es la subfamilia CYP1A (Goksøyr y Forlin, 1992; Stegeman y Hahn, 1994). El uso de la expresión del gen de CYP1A puede ser utilizado en las evaluaciones de riesgo ambiental durante la cuantificación e impacto de la exposición a varios contaminantes orgánicos a niveles traza, en estudios de monitoreo que pueden llevar a las acciones de remediación, determinación de compuestos específicos y pruebas toxicológicas. Una gran cantidad de xenobióticos con amplia distribución en el ambiente son reportados con actividad endocrina que puede afectar la reproducción y, por lo tanto, constituyen una amenaza para las especies susceptibles (Colborn *et al.*, 1993; Peterson *et al.*, 1993). La vitelogenina (VTG) es la fosfolipoproteína precursora de la yema de huevo, expresada bajo condiciones normales en las hembras maduras de peces, reptiles, anfibios y aves. Bajo contaminación con compuestos que actúan como “disruptores” endocrinos, la expresión de la vitelogenina se puede inducir tanto en machos como en organismos juveniles (Scholz *et al.*, 2004; Kime *et al.*, 1999). La VTG se volvió en poco tiempo un biomarcador molecular comúnmente usado para detectar rápidamente los efectos estrogénicos de numerosos compuestos químicos y de muestras ambientales (Kime *et al.*, 1999).

Se determinó la expresión genética de los genes CYP1A y VTG en peces cebra enjaulados, en diferentes cuerpos de agua del norte de Yucatán, como un indicador de exposición a contaminantes (Rodríguez-Fuentes *et al.*, 2012). Basados en el hecho de que existen informes en los cuales se reporta contaminación de las aguas subterráneas en la península de Yucatán, se esperaba que al evaluar efectos moleculares en juveniles del pez cebra se obtuviera en todos los sitios inducción de los genes para VTG y CYP1A con niveles significativamente superiores a la presentada en peces control.

El estudio se realizó en 13 cuerpos de agua localizados en la zona norte del estado de Yucatán (**Figura 2**). La zona de estudio se dividió en tres sub-zonas: la zona A se encuentra localizada al noreste de Mérida; la zona B, al sur de Mérida, y la zona C, al suroeste de Mérida. Todos los puntos muestreados están situados sobre el llamado Anillo de Cenotes. Se tomaron los datos de pH, temperatura, conductividad y oxígeno disuelto, lo más cercano a donde se colocó la trampa.

Se colocaron tres trampas conteniendo cinco peces cada una en los 13 cuerpos de agua. La exposición de los organismos se realizó durante 15 días, iniciando el 1 de marzo de 2010. Una vez terminada la exposición, los peces fueron colocados en botellas de polietileno de alta densidad

con capacidad de 1 litro y se transportaron a Mérida, donde fueron sacrificados por choque térmico y disectados. La muestra se conservó en RNAlater® y en hielo durante su traslado al laboratorio y se mantuvo a -70 °C hasta su procesamiento.

Se retiraron las muestras del RNAlater® y se realizó la extracción de RNA total utilizando el Sigma Gen Elute® Mammalian Total RNA Minipreparation Kit. Una vez obtenido el RNA, se realizó la cuantificación de RNA en 1 µl de muestra utilizando el Nanodrop. Posteriormente, se realizó la retrotranscripción de 400 ng de RNA utilizando el SYBR Green Super Script® III Platinum Two Step Kit; 2 µl de cDNA se utilizaron para la amplificación por medio de PCR tiempo real. Para este estudio se utilizó a la β-actina como gen de control interno. Cada una de las muestras se corrió por triplicado para cada uno de los genes.

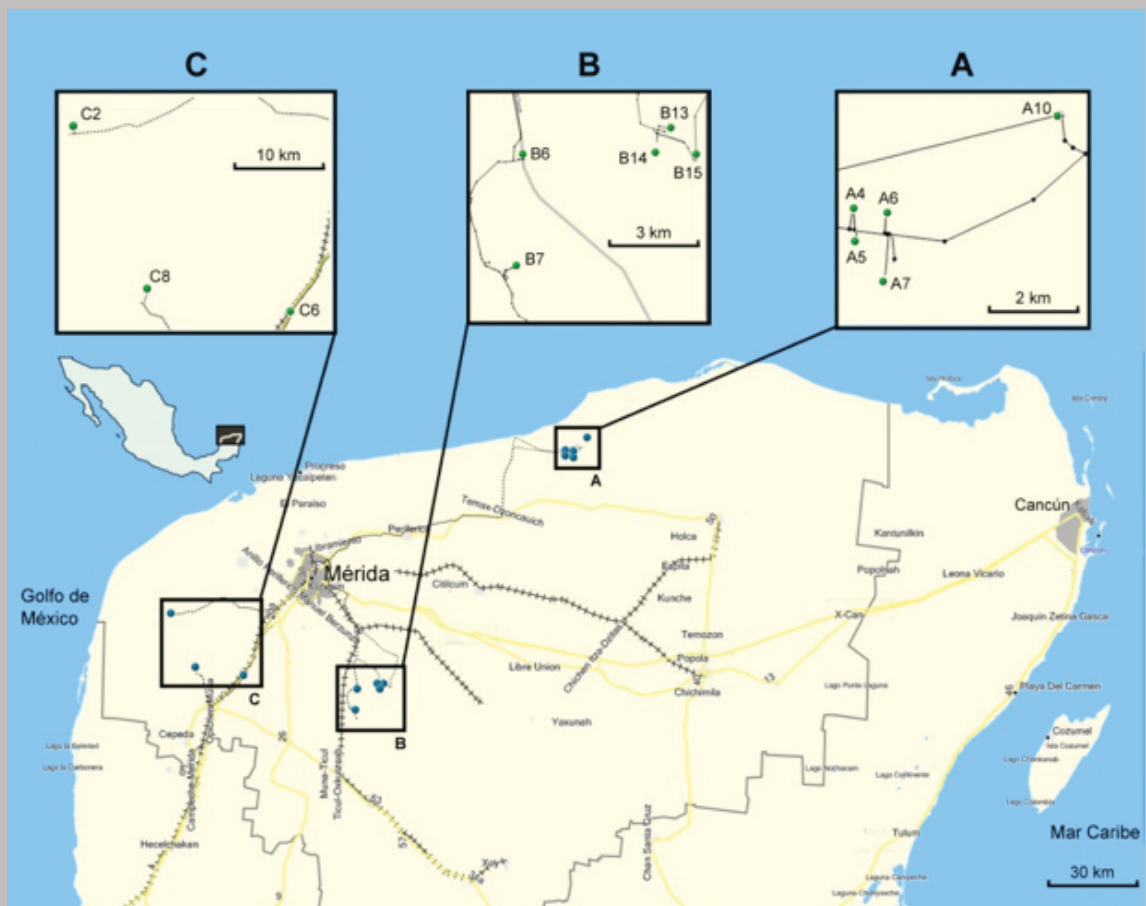


Figura 2. Zona de estudio (elaborada por Emiliano Monroy-Ríos).

En el **Cuadro 1** se resumen las condiciones de los parámetros fisicoquímicos para las zonas donde se pusieron trampas en los cuerpos de agua estudiados.

Cuadro 1. Parámetros fisicoquímicos de los cuerpos de agua donde se colocaron las trampas. St= la trampa no fue recuperada.

Zona	Sitio	Trampa	Condiciones Iniciales				Condiciones Finales			
			Temperatura °C	Conductividad uS/cm	OD mg/l	pH	Temperatura °C	Conductividad uS/cm	OD mg/l	pH
A	A4 Rancho 88-1	A4-T1	23.1	736	10.8	8.5	26.8	739	11.9	8.5
		A4-T2	22.6	743	10.5	8.5	26.9	739	11	8.5
		A4-T3	24.2	732	9.68	8.4	27.3	742	11.8	8.5
	A5 Rancho Ganadero	A5-T1	26.4	554	10.6	8.1	st	St	St	St
		A5-T2	24.7	556	10.5	8.2	27.9	556	9.13	8.2
		A5-T3	24.3	576	9.74	8.3	26.8	551	9.73	8.1
	A6 Box Dzonot	A6-T1	23.2	809	7.96	7.6	26.4	813	6.97	7.6
		A6-T2	23.4	815	4.8	7.5	27.9	817	6.82	7.6
		A6-T3	23.4	811	4.9	7.6	26.5	815	7.08	7.6
	A7 Rancho San Juan	A7-T1	23.1	1122	8.9	7.5	26.2	1116	13.5	8.1
		A7-T2	22.7	1130	7.14	7.7	25.6	1112	11.2	8.1
		A7-T3	22.9	1136	8.8	8.4	26.3	1119	12.1	8.1
	A10 Xlabon Subim	A10-T1	23.2	1132	5.4	7.7	26.6	1124	8.83	8.4
		A10-T2	22.9	1141	6.81	7.8	27.7	1133	12	8.8
		A10-T3	22.8	1113	6.18	7.8	st	St	st	St
B	B6 Yaxputol	B6-T1	25.5	1061	8.28	7.2	26.2	1063	8.02	8
		B6-T2	25.7	1060	7.26	7.3	26.2	1063	8.02	8
		B6-T3	25.7	1060	7.26	7.3	26.2	1063	8.02	8
	B7 Telchaquillo	B7-T1	27.2	1529	3.71	6.9	st	St	st	St
		B7-T2	27.2	1529	3.71	6.9	27	1537	3.94	6.9
		B7-T3	27.2	1529	3.71	6.9	st	St	st	St
	B13 Calcuch	B13-T1	25.3	650	7.52	7.5	25.4	660	7.3	7.3
		B13-T2	25.3	650	7.52	7.5	25.4	660	7.3	7.3
		B13-T3	25.3	650	7.52	7.5	25.4	660	7.3	7.3
	B14 Tanimax	B14-T1	26.5	646	3.46	7.1	26.9	645	3.46	7.2
		B14-T2	26.5	646	3.46	7.1	26.9	645	3.46	7.2
		B14-T3	26.5	646	3.46	7.1	26.9	645	3.46	7.2
	B15 Chonkola	B15-T1	24.4	671	5.03	7.2	25.7	672	5.6	7.2
		B15-T2	24.4	671	5.03	7.2	25.7	672	5.6	7.2
		B15-T3	24.4	671	5.03	7.2	25.7	672	5.6	7.2
C	C2	C2-T1	26.3	2580	2.72	8.3	23.4	2630	9.94	8.3
		C2-T2	26.3	2580	2.72	8.3	23.4	2630	9.94	8.3
		C2-T3	26.3	2580	2.72	8.3	23.4	2630	9.94	8.3
	C6 Chen-ha	C6-T1	25.1	2200	7.8	7.2	st	St	st	St
		C6-T2	25.1	2200	7.8	7.2	st	St	st	St
		C6-T3	25.1	2200	7.8	7.2	26.1	2230	8.83	7.8
	C8 Chen-keken	C8-T1	26.6	2810	7.8	6.8	26.8	2790	3.28	6.9
		C8-T2	26.6	2810	7.8	6.8	26.8	2790	3.28	6.9
		C8-T3	26.6	2810	7.8	6.8	26.8	2790	3.28	6.9
0	Control	Control	25	874	8.1	8	25	874	8.1	8

Durante el proceso de colecta de las muestras se detectó mortalidad del 87% de los organismos expuestos en el cenote A7 y un 100% de mortalidad en la aguada C2. Se encontraron diferencias estadísticamente significativas en el ANOVA, al analizar los resultados de expresión relativa para el gen VTG. Los resultados del análisis de expresión genética por medio de RT-PCR para el gen de VTG presentaron tres zonas con expresiones relativas 100 veces más altas que en el control (**Figura 3**). En el punto A5-T3, de hecho, se encontraron expresiones relativas comparables a las presentes en hembras adultas pre-desove. Ocho puntos resultaron con expresiones relativas estadísticamente significativas respecto al control.

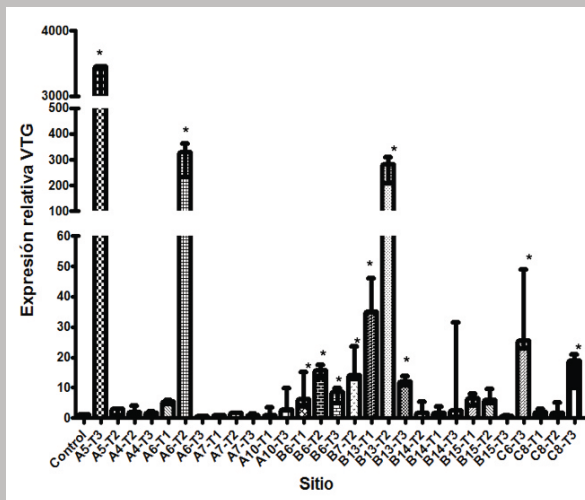


Figura 3. Expresión genética de VTG en peces cebras enjaulados en diferentes cuerpos de agua de Yucatán. Las barras representan el valor de las medianas y los bigotes representan el rango intercuartílico. * denota diferencias significativas respecto al control $p=0.05$.

Los resultados del ANOVA para el estudio de expresión relativa del gen CYP1A (**Figura 4**) arrojaron diferencias estadísticamente significativas. La prueba post-hoc determinó que los sitios A4-T3, B6-T2 y B13-T2 fueron estadísticamente significativos con respecto a la expresión de los peces control.

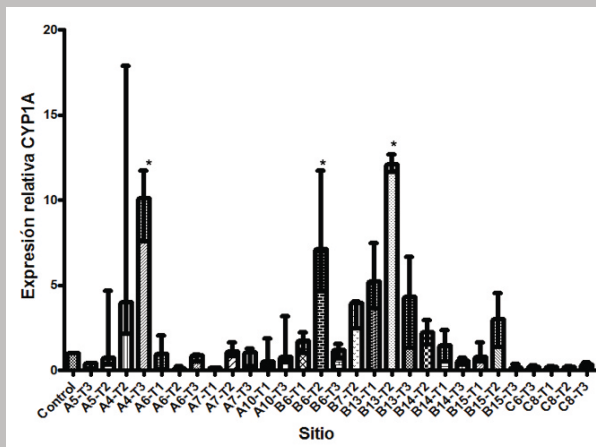


Figura 4. Expresión genética de CYP1A en peces cebras enjaulados en diferentes cuerpos de agua de Yucatán. Las barras representan el valor de las medianas y los bigotes representan el rango intercuartílico. * denota diferencias significativas respecto al control $p=0.05$.

La determinación de parámetros fisicoquímicos (temperatura, pH, conductividad y OD) indican condiciones que *per se* no comprometen la fisiología del pez cebra (NOAA, 2009). Sin embargo, fue posible observar mortalidad en dos cuerpos de agua: A4 y C2. Observaciones realizadas en el campo por el personal que participó en la campaña, indicaron la presencia de espuma de origen químico producido probablemente por algún surfactante en los sitios donde se recolectaron las trampas (**Figura 5**). Asimismo, las condiciones observadas en el cuerpo de agua C2 son las presentes en un cuerpo eutrofizado con una marcada presencia de microalgas que le daban al agua un color verde profundo (**Figura 6**).



Figura 5. Espuma encontrada en el cuerpo de agua A4 donde se observó mortalidad de los organismos.



Figura 6. Presencia de microalgas en la aguada C2 donde se observó mortalidad de los organismos.

Los resultados de la expresión relativa para el gen VTG indicaron la presencia de un total de 10 sitios donde se encontraron niveles estadística y significativamente más altos que el control. Estudios anteriores han demostrado la gran sensibilidad de la expresión del gen VTG al ser utilizada como biomarcador; por ejemplo, Tong *et al.* (2004) determinaron que en concentraciones tan bajas como 1 $\mu\text{g/L}$ de 17 β -estradiol es posible observar la inducción del gen. Es de resaltar la aumentada sobreexpresión del gen de VTG en el punto A5-T3, el valor obtenido es similar a lo que tendría una hembra madura, dado que no se observó una diferencia en talla entre los organismos utilizados al estudio, es posible inferir que los organismos en este sitio estuvieron expuestos a xenoestrógenos provenientes probablemente de la actividad ganadera que se desarrolla en la zona. La presencia de otras zonas con diferencias estadísticamente significativas para la expresión del gen VTG pudiera estar ligada a la presencia de agroquímicos que se observaron en toda la zona de estudio, principalmente en la zona A, donde fue posible observar envases vacíos de 2,4 D, Asuntol y Paraquat (**Figura 7**). El herbicida 2,4 D y el Paraquat han sido reportados

previamente como compuestos disruptores endócrinos y se han reportado efecto sobre especies silvestres (Orme y Kegley, 2004). Xie y colaboradores (2005) determinaron que el 2,4 D puede ser un disruptor endocrino que pudiera causar efectos adversos en los órganos reproductivos, debido a la interrupción de los procesos mediados por el receptor de estrógeno. Los cenotes B6, B7 y B13 son utilizados para actividades recreativas por los habitantes de la localidad, lo cual pudiera producir entradas puntuales de xenoestrógenos.

Las conclusiones del estudio indican la primera evidencia de efecto de alteraciones endocrinas y de sobreexpresión de enzimas de desintoxicación ligadas a la presencia de contaminantes en el agua subterránea de Yucatán. En este estudio fue imposible correlacionar las expresiones genéticas con la presencia de un contaminante en particular. Sin embargo, los resultados *per se* indican que existen contaminantes biodisponibles en los sitios muestreados que son capaces de generar un efecto en el pez cebra. Esto es una alerta temprana que debe llevar a estudios más profundos de los contaminantes presentes en el acuífero de Yucatán que pudieran representar un riesgo a la salud humana y al ecosistema.



Figura 7. Presencia de envases de contaminantes orgánicos en la zona de estudio.

El guayacón yucateco (*Gambusia yucatanana*)

En cuanto al uso de especies locales para la evaluación ecotoxicológica, se ha sugerido el uso del guayacón yucateco (*Gambusia yucatanana*, **Figura 8**) como un buen bioindicador de la calidad del agua de los cenotes (Osten *et al.*, 2005). El género *Gambusia* (*Teleostei: Poeciliidae*) es el pez más abundante de la península de Yucatán (Pérez-León y Schmitter-Soto, 2007), el género incluye peces de tamaño pequeño, distribuido ampliamente de Veracruz a Guatemala y Belice, así como en toda la península de Yucatán, inclusive en cenotes continentales, pero tiende a estar distribuido en la costa.

El uso de la actividad de las colinesterasas como biomarcador de neurotoxicidad ha sido ampliamente utilizado para evaluar el efecto de plaguicidas organofosforados, carbamatos y otros contaminantes. Su facilidad de uso, su costo y su alta sensibilidad han hecho que este biomarcador esté presente en numerosos programas de biomonitorio ambiental. Debido a que se ha reportado que algunas variables biológicas pueden tener un efecto en la actividad, se ha recomendado que se haga una caracterización.

Figura 8. Guayacón yucateco (*Gambusia yucatanana*) utilizado como bioindicador.



Las colinesterasas (ChE) son enzimas que presentan dos grupos homólogos: la acetilcolinesterasa (AChE) y la butirilcolinesterasa (BChE) también llamada pseudocolinesterasa o colinesterasa no específica (Sturm *et al.*, 1999). La AChE está unida a las membranas celulares de los tejidos excitables (conjunciones sinápticas, retículo endoplásmico, etc.) y está asociada a la conducción del impulso nervioso (Politoff *et al.*, 1975; Nachmansohn, 1970). La AChE cataliza la hidrólisis de la ACh; la reacción procede por medio de un ataque nucleofílico al carbono carbonílico, acilando la enzima y liberando colina. Esto es seguido de una rápida hidrólisis de la enzima acilada produciendo ácido acético, y la restauración del sitio activo (Wilson, Bergmann y Nachmansohn, 1950). En los vertebrados, la BChE se expresa en las células hematopoyéticas, así como en el plasma, el tejido embrionario, las sinapsis colinérgicas y en el sistema nervioso central. Los criterios de clasificación de las ChEs fueron hechos para los mamíferos, pero han sido utilizados para una

gran variedad de organismos, vertebrados e invertebrados. En estudios de ecotoxicología se han incluido la caracterización de las ChEs en diferentes órganos debido a que se ha encontrado que en el mismo organismo puede existir más de una ChE y que éstas presentan diferente sensibilidad a los contaminantes (Sturm *et al.*, 1999) y, por lo tanto, diferentes usos posibles en ecotoxicología.

Muchos plaguicidas organofosforados (OF) y carbamatos (CB) son inhibidores clásicos y efectivos de las ChEs. La inhibición de estas enzimas se ha utilizado para evaluar la naturaleza y extensión de la exposición a plaguicidas en el ambiente (Day y Scott, 1990, Galgani y Bocquené, 1990, Payne *et al.*, 1996). Los OF y CB son agroquímicos no persistentes que en comparación con los insecticidas organoclorados (OCI) tienen un menor efecto residual en los ecosistemas terrestres y acuáticos, los cuales, una vez que son ingeridos o absorbidos por los animales, se metabolizan y excretan rápidamente; para indicar la exposición a estos agentes se mide la actividad de las ChEs como biomarcador de estos plaguicidas, en vez de usar otras técnicas de Química Analítica para detectar a los plaguicidas o sus productos del metabolismo (Moulton *et al.*, 1996).

Los cambios en los niveles de actividad de las ChEs pueden indicar los niveles de daño neuronal, el cual, dependiendo del grado de inactivación de la AChE, puede producir la muerte del organismo. Por lo general, se considera que una inhibición mayor al 50 % de la actividad de la AChE en el cerebro puede significar que el organismo se encuentre fisiológicamente comprometido, lo cual potencialmente lo puede conducir a la muerte (Payne *et al.*, 1996). La inhibición de la AChE no es exclusivamente por OF y CB. Algunos estudios han demostrado que compuestos como los detergentes, que contienen compuestos de amonio terciario y cuaternario, mezclas complejas de contaminantes, subproductos del pulpeo de la madera y otros aditivos también poseen propiedades que inhiben a la AChE (Payne *et al.*, 1996). Además, se ha determinado un efecto inhibitorio producido por el petróleo crudo (Rodríguez-Fuentes *et al.*, 2000; Martínez-Tabche *et al.*, 1997).

Durante la primera fase, se procedió a caracterizar bioquímicamente las colinesterasas presentes en el músculo y en la cabeza de *G. yucatanana*, los resultados indicaron que la colinesterasa presente es una acetilcolinesterasa con características atípicas (Rodríguez-Fuentes *et al.*, 2016).

En la fase dos, se realizó la colecta de organismos en cinco cenotes localizados en el Anillo de Cenotes (**Figura 9**) en mayo de 2014. Algunos organismos fueron trasladados al laboratorio y se mantuvieron en agua libre de contaminantes durante seis semanas para ser utilizados como referencia.

Una vez realizada la caracterización bioquímica, se procedió a determinar la actividad de AChE en cabeza y músculo de los organismos. Los resultados indicaron que los machos son menores en tamaño que las hembras. La gran mayoría de los organismos capturados para este estudio presentaron una longitud entre 25 y 35 mm. No se observó linealidad entre la actividad de AChE de músculo y cabeza con la longitud total, lo cual no fue consistente con previos reportes en otros peces; por ejemplo en *Leusiscus cephalus* (Flammarion *et al.*, 2002) y *Oreochromis niloticus* (Gold-Bouchot *et al.*, 2006). Adicionalmente no se encontró un efecto de sexo en la actividad de AChE, como sucede en otros peces (Rodríguez-Fuentes *et al.*, 2008).

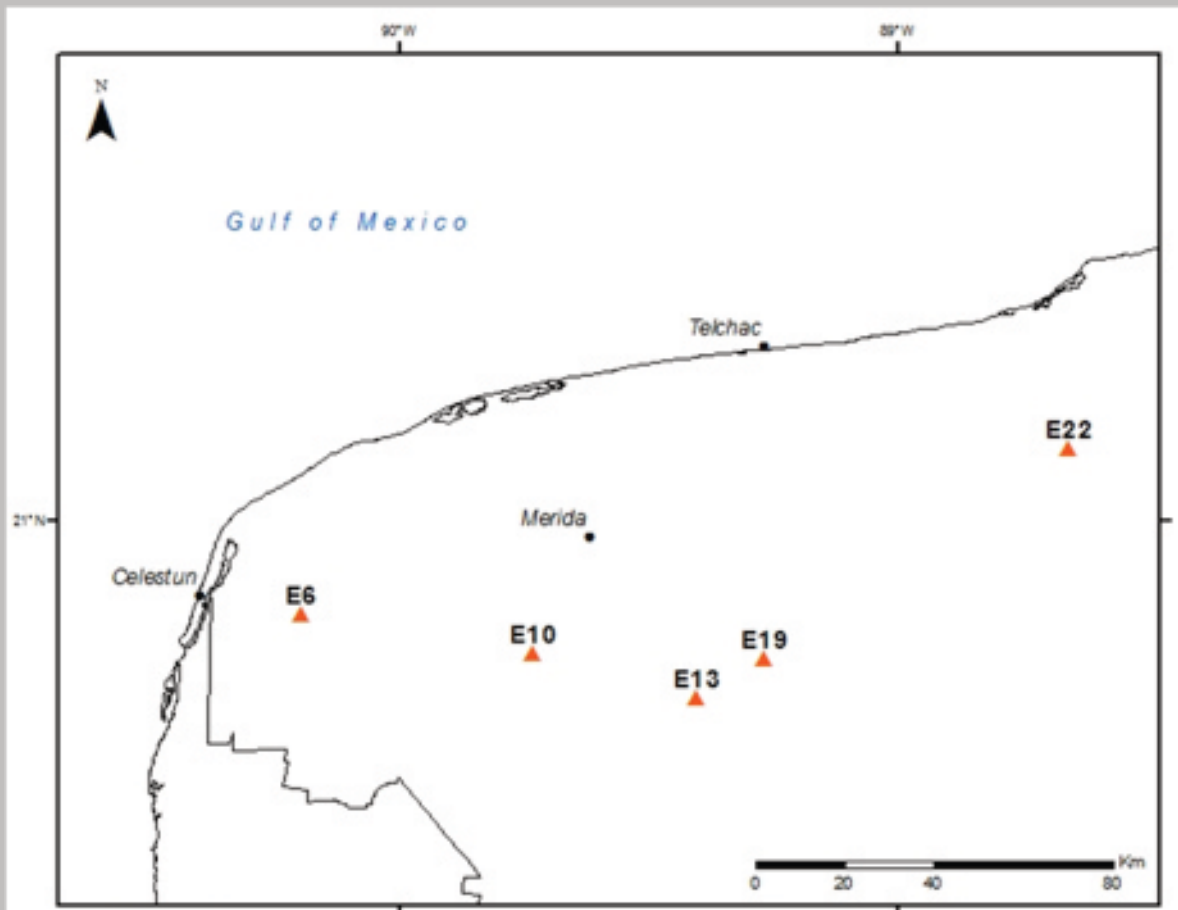


Figura 9. Sitios de muestreo de *Gambusia yucatana silvestres* en la península de Yucatán. Los sitios muestreados fueron E6 Rancho Santa Julia (20° 48' 47.9" N, 90° 11' 46.8" W); E10 Yaxcopoil (20° 44' 11.3" N, 89° 43' 55.4" W), E13 Nah-Yah (20° 38' 47.4" N, 89° 24' 16.6"W), E19 Yaxbacaltún (20° 43' 37.2"N, 89° 16' 05.3"W), E22 Chen Vázquez (21°08'54.2"N, 88°39'28.2"W).

Al comparar la actividad de AChE en los organismos provenientes de los cenotes con los organismos de referencia del laboratorio (**Figura 10**), sólo fue posible encontrar una diferencia significativa en el cenote Nah-Yah (sitio 13), cerca de Pixyah, en el municipio de Tecoh, donde se reportan 724 unidades de producción agrícola, distribuidas en un área de 4 000 hectáreas (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015a).

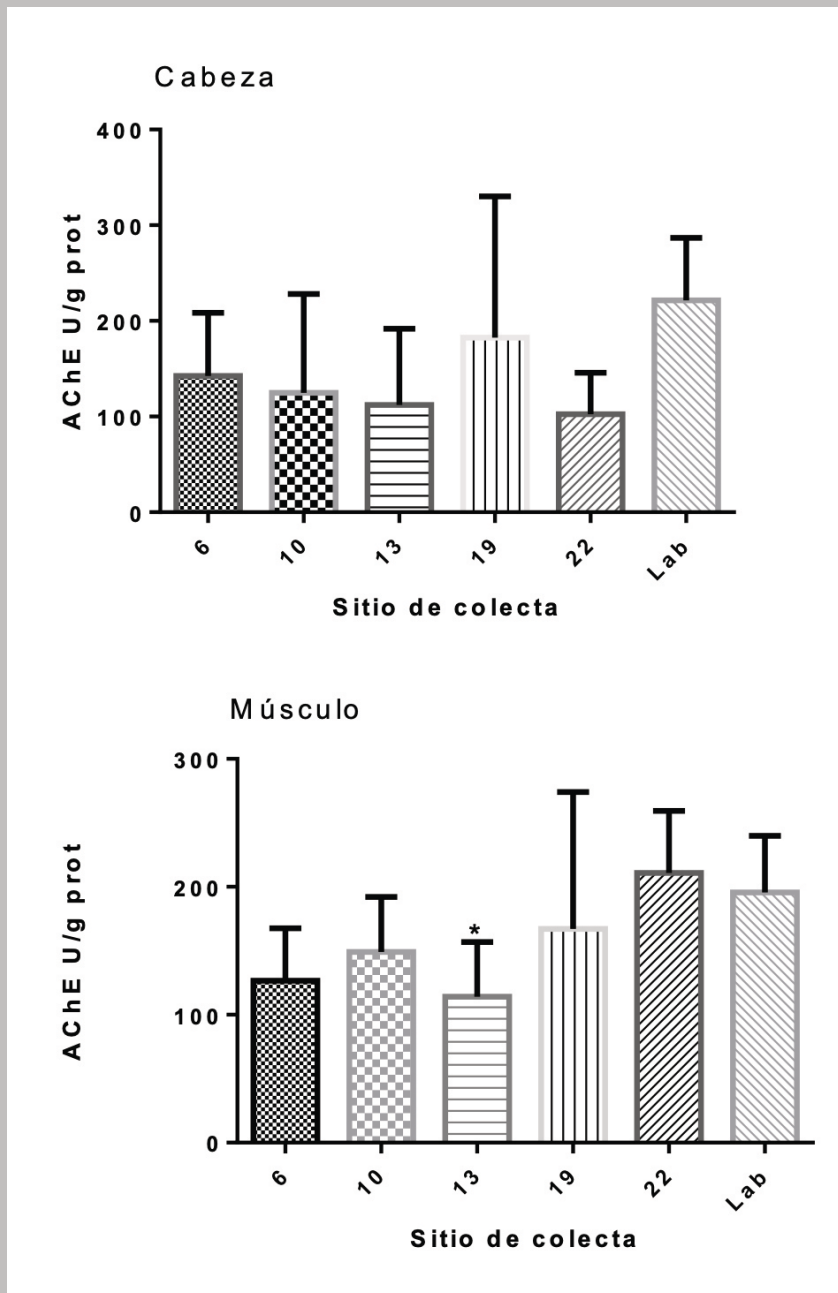


Figura 10. Actividad de AChE en músculo y cabeza de *Gambusia yucatanensis* silvestres de cinco cenotes de la península de Yucatán. Las barras representan las medias \pm SD, * indica diferencias significativas respecto a organismos depurados en el laboratorio.

Para complementar la información aportada por la actividad de la AChE en los peces colectados en los cenotes, en mayo de 2014 se tomaron muestras de sedimento en cada uno de los sitios de muestreo para determinar la concentración de plaguicidas organoclorados y también los niveles de Clorpirifos, un compuesto organofosforado ampliamente utilizado como plaguicida.

Los sedimentos colectados en los cenotes fueron liofilizados y tamizados a través de una luz de malla de 500 µm. El análisis de plaguicidas se realizó empleando la técnica basada en los métodos de la EPA 3550C, 3535A y 1699 (EPA, 2007a; EPA, 2007b; EPA, 2007c).

Se realizó una extracción asistida por ultrasonido (USE) de cada muestra con una mezcla de hexano: acetona (1:1, v/v) durante dos minutos continuos, empleando un procesador ultrasónico marca Cole Parmer a una amplitud de 70%; posteriormente, se realizó una limpieza de los extractos obtenidos por extracción en fase sólida (EFS) empleando cartuchos de C18 de 500 g/6 mL y desplazando los analitos de interés empleando hexano: acetona (9:1, v/v). La concentración de plaguicidas se determinó por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM) en modo de monitoreo selectivo de iones (SIM), empleando estándares analíticos para la identificación y cuantificación de los compuestos (Organochlorine Pesticides Mixture #1-508 Chemservice, Chlorpyrifos Pestanal 45395-100MG Sigma-Aldrich).

Cuadro 2. Concentración de Clorpirifos y plaguicidas organoclorados totales en sedimentos de cenotes del estado de Yucatán, colectados en mayo de 2014.

Cenote		Clorpirifos	Plaguicidas OC totales
Nombre	Número	ng/g	ng/g
Rancho Santa Julia	E6	3.60	925.96
Yaxcopoli	E10	n.d.	283.99
Nah-Yah	E13	3.52	1711.08
Yaxbacaltún	E19	n.d.	1069.44
Chen Vázquez	E22	n.d.	1227.18

En el **Cuadro 2** se presentan las concentraciones (ng/g) de organoclorados totales y de Clorpirifos en cada uno de los sitios estudiados. El Clorpirifos se detectó únicamente en dos cenotes: el del Rancho Santa Julia (E6) y el Nah-Yah (E13); sin embargo, los niveles detectados en las dos estaciones superan el umbral regulatorio de 1.1 ng/g (RTL, Regulatory Threshold Level) reportado por Stehle y Shultz (2015) para este plaguicida en sedimentos.

Los plaguicidas organoclorados sí estuvieron presentes en todos los sitios estudiados, la menor concentración fue de 238.99 ng/g en el cenote Yaxcopoil (E10) y los niveles más altos se registraron en el cenote Nah-Yah (E13) con 1711.08 ng/g, registrándose una media (\pm una desviación estándar) en toda la zona de estudio de 902.55 \pm 576.76 ng/g.

En un muestreo posterior, realizado en mayo de 2015, en la misma zona de estudio, se tomaron muestras de agua para determinar los niveles de plaguicidas organoclorados y de Clorpirifos para verificar si se encontraban los mismos compuestos en las dos matrices y monitorear las concentraciones. La determinación de plaguicidas en agua se realizó por extracción en fase sólida (EFS), empleando cartuchos poliméricos de fase reversa Strata-X de 500 mg/6 mL (Phenomenex 8B-S100-HCH) y los compuestos individuales fueron identificados y cuantificados por cromatografía de gases acoplada a espectrometría de masas (CG-EM), en modo de monitoreo selectivo de iones (SIM).

En el **Cuadro 3** se presentan las concentraciones (ng/L) de los plaguicidas en el agua de los cenotes. El Clorpirifos solamente fue detectado en el Rancho Santa Julia, con una concentración de 1.78 ng/L, este plaguicida también estuvo presente en los sedimentos colectados en este cenote en mayo de 2014.

Cuadro 3. Concentración de Clorpirifos y plaguicidas organoclorados totales en muestras de agua de cenotes del estado de Yucatán colectadas en mayo de 2015.

Cenote		Clorpirifos	Plaguicidas OC totales
Nombre	Número	ng/g	ng/g
Rancho Santa Julia	E6	1.78	45.78
Yaxcopoli	E10	n.d.	88.94
Nah-Yah	E13	n.d.	62.04
Yaxbacaltún	E19	n.d.	59.44
Chen Vázquez	E22	n.d.	53.02

La concentración de Clorpirifos en el Rancho Santa Julia no supera el umbral regulatorio de 50 ng/L reportado por Stehle y Shultz (2015) para agua dulce en Norteamérica. Por otro lado, como ocurrió en el caso de los sedimentos, los plaguicidas organoclorados sí estuvieron presentes en toda la zona de estudio, encontrándose el valor mínimo de plaguicidas totales (45.78 ng/L) en el Rancho Santa Julia (E6) y el valor máximo (88.94 ng/L) en el cenote Yaxcopoil (E10); registrándose una media (\pm una desviación estándar) en toda la zona de estudio de 61.84 ± 16.40 ng/L.

En el **Cuadro 4**, se presenta una comparación de los plaguicidas organoclorados individuales encontrados en el sedimento y en el agua de los cenotes estudiados, así como la frecuencia (%) con la que cada compuesto fue detectado en esa matriz en particular en los sitios estudiados (por ejemplo, Frecuencia=100% si el plaguicida estuvo presente en todos los cenotes). Puede observarse que en el sedimento se detectaron 14 plaguicidas individuales, mientras que en el agua únicamente se detectaron la mitad de los compuestos, es decir, un total de siete plaguicidas.

Cuadro 4. Plaguicidas individuales encontrados en la zona de estudio, así como la frecuencia en la que cada compuesto fue detectado en los cenotes muestreados.

TIPO DE PLAGUICIDA	SEDIMENTO (mayo 2014)		AGUA (mayo 2015)	
	Presencia	Frecuencia (%)	Presencia	Frecuencia (%)
α -HCH	✓	40	✓	100
β -HCH	✗	--	✗	--
γ -HCH	✓	100	✓	100
δ -HCH	✓	100	✗	--
Aldrín	✓	100	✓	40
Dieldrín	✓	20	✗	--
Endrín	✗	--	✗	--
Endrín cetona	✓	20	✓	20
Endrín aldehído	✗	--	✗	--
Heptacloro	✓	100	✗	--
Epóxido de heptacloro	✗	--	✗	--
cis-Clordano	✗	--	✗	--
trans-Clordano	✓	20	✗	--
α -Endosulfán	✓	60	✗	--
β -Endosulfán	✓	60	✓	20
Sulfato de endosulfán	✗	--	✗	--
4,4'-DDE	✓	60	✓	100
4,4'-DDD	✓	20	✓	20
4,4'-DDT	✓	80	✗	--
Metoxicloro	✓	40	✗	--

Esto puede deberse a que los plaguicidas organoclorados estudiados son poco solubles en agua, siendo más bien lipofílicos y afines a adsorberse en el sedimento; por lo que el número de compuestos disueltos/dispersos en la columna de agua es menor si se compara con los analitos presentes en el sedimento; de la misma manera, se puede observar que las concentraciones de los plaguicidas en los sedimentos son tres órdenes de magnitud más altas (ng/g vs ng/L) que aquéllas observadas en los sedimentos recientes.

Aunque son escasos, se han realizado estudios previos en Yucatán enfocados en la presencia de plaguicidas; de manera más específica, Polanco-Rodríguez *et al.* (2015a) analizaron muestras de agua colectadas en el Anillo de Cenotes (20 sitios de muestreo) para la determinación de plaguicidas organoclorados, reportando concentraciones de compuestos individuales, tres o cuatro órdenes de magnitud más altas que las encontradas en este estudio. Las diferencias podrían deberse a cambios en la presencia de fuentes que aporten plaguicidas a los cenotes, ya que los estudios se realizaron con cinco años de diferencia; así como también a que los cenotes estudiados no son los mismos, con excepción del cenote Nah-Yah en el municipio de Tecoh (E13 de este estudio) y el cenote Chen Vázquez en el municipio de Buctzotz (E22 de este estudio). A pesar de las diferencias, en ambos trabajos se detectó DDT y sus metabolitos con una alta frecuencia, así también el plaguicida heptacloro; de igual manera, Polanco-Rodríguez y colaboradores (2015) enuncian a Tecoh entre los municipios más contaminados del estado, lo que se confirma con los datos observados en este trabajo, ya que en el cenote Nah-Yah se detectó la concentración más alta de plaguicidas organoclorados totales en sedimentos y la segunda más alta en agua (**Cuadros 2 y 3**), así como una mayor inhibición de la acetilcolinesterasa en el músculo de *G. yucatanana* (**Figura 8**).

Cobos *et al.* (2014) también determinaron plaguicidas organoclorados en agua de ocho cenotes en el estado de Yucatán (Yal Ek, Celestún, Chan-Hulú, Noh-hulú, Alborada, Xlaká, Sabak-há, Mono), detectando aldrín, endrín, clordano, HCH, endosulfán, heptacloro, metoxicloro y DDT en concentraciones entre 0.37 y 1.81 ng/mL. Los compuestos individuales coinciden con los encontrados en el agua y/o en los sedimentos de los cenotes considerados en este estudio, salvo por el endrín, compuesto que no fue detectado en el muestreo realizado para el presente trabajo. Sin embargo, Cobos *et al.* (2014) encontraron niveles más altos de dichos plaguicidas y reportan también que las mayores concentraciones fueron detectadas en cenotes ubicados en la zona este del estado, es decir, en donde hay más actividad ganadera y agrícola.

En un estudio más reciente, realizado en 2016, Rendón-von Osten y colaboradores (2016) midieron plaguicidas organoclorados en agua de

cinco cenotes en la península de Yucatán (Chen Ha, Xelactum y Yax Ha en Yucatán; Cueva serpiente en Quintana Roo y Miguel Colorado en Campeche), encontrando diferentes isómeros de HCH, dieldrín, endrín, endrín cetona, β -endosulfán, p,p'-DDD y p,p'-DDE en niveles que van desde 9 hasta 89 ng/L; valores que son comparables con los reportados en el presente trabajo.

Aunque la importación de muchos plaguicidas organoclorados está prohibida o restringida desde hace varios años (en algunos casos inclusive décadas), su uso se ha reportado en varios municipios de Yucatán, para ser utilizado en actividades agrícolas y ganaderas (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015b). Algunos de los municipios reportados coinciden con las áreas donde se localizan los cenotes muestreados en este estudio, por ejemplo: endosulfán, heptacloro y lindano se utilizan en Buctzotz, Dzilam y Tecoh; aldrín y dieldrín, en Buctzotz y Dzilam, y DDT en Buctzotz, Dzilam y Celestún (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015b). A diferencia de los organoclorados, el Clorpirifos es un plaguicida cuyo uso está permitido y que se vende sin restricciones en nuestro país. De acuerdo con Pérez-Herrera *et al.* (2008), el Clorpirifos está entre los plaguicidas reportados como utilizados en las comunidades agrícolas de Yucatán.

Reflexiones finales

Existe evidencia de alteraciones endócrinas e inducción de enzimas de desintoxicación en peces expuestos a cuerpos de agua de Yucatán, lo cual es indicio de exposición a contaminantes en concentraciones biodisponibles que causaron un efecto en peces transplantados a la zona de estudio. Por otro lado, también resulta evidente la respuesta de la enzima AChE en peces nativos presentes en los cenotes (*G. yucatanana*), en los cuales se vio que la actividad de esta enzima en uno de los puntos muestreados resultó significativamente inferior a lo detectado en peces mantenidos en condiciones de laboratorio y que pudiera estar relacionado con la exposición a plaguicidas organofosforados y carbamatos.


En todos los cenotes muestreados, tanto en agua como en sedimentos, se detectó la presencia de plaguicidas organoclorados y en dos de ellos también estuvo presente el Clorpirifos, plaguicida organofosforado. Estos compuestos tóxicos también se han reportado en otros estudios hechos en cenotes de Yucatán. La presencia de estos plaguicidas puede estar relacionada con su uso en actividades agropecuarias realizadas en la zona y su transporte a través del karst.

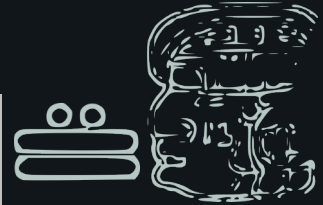
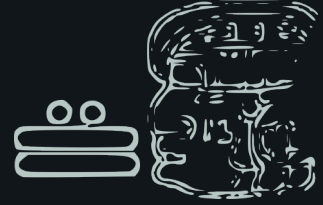
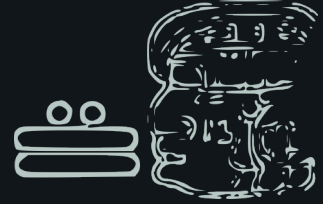
Hay variaciones en las concentraciones reportadas dependiendo del año de muestreo, por lo que es importante realizar estudios de monitoreo constantes para generar información confiable que pueda ser utilizada para tomar medidas de manejo efectivas, que permitan proteger la calidad del agua del acuífero de la península de Yucatán.

Agradecimientos

A Mélima Soto, Karen Luna-Ramírez, Esperanza Hernández-Márquez y Valeria Marín-López por todo su trabajo durante la colecta y procesamiento de las muestras. Parte de este trabajo fue financiado por los proyectos UNAM-PAPIIT-DGAPA IA200214 e IA202416.



 *Cenote Yaal Utzil, ubicado en el pueblo de Mucuyché, Yucatán. Es un cenote abierto con aguas azules cristalinas. Hasta ahora es uno de los cenotes explorados con más desarrollo cavernoso. Buzo: José Palacios. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



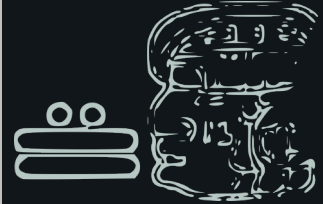
Capítulo 12

Diagnóstico de contaminantes emergentes como fuentes de impacto en los ecosistemas acuáticos subterráneos del acuífero de Yucatán

Rosa M. Leal Bautista,¹
Cinthya D. Grimaldo Hernández,¹
Melissa Lenczewski²

¹Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY)

²Northern Illinois University, USA



Introducción

Existen casos de contaminación que se les vincula con una gran diversidad de microorganismos, los cuales se distribuyen en todo tipo de hábitats, incluso en sitios con condiciones sumamente hostiles para el desarrollo de la vida. Por este motivo, un gran número de investigadores han dedicado sus estudios a la relación de los microorganismos patógenos en el agua y la relación de éstos con la salud de las personas.

Los coliformes totales constituyen un grupo heterogéneo de bacterias que se encuentran en el medio ambiente. Dado que éstas mantienen una ínfima relación con la materia fecal, su presencia en el agua significa la degradación de la calidad microbiana de ésta, así como la vulnerabilidad del cuerpo receptor.

Para detectar contaminación fecal y riesgos sanitarios asociados, es importante realizar un monitoreo de coliformes termotolerantes (llamados también *fecales*), específicamente de *Escherichia coli*. Investigaciones realizadas han demostrado que los coliformes se comportan como patógenos y son más fáciles de monitorear debido a que son más numerosos, aunado a que las técnicas para cuantificarlos son más sencillas y rápidas. Asimismo, la prueba positiva de coliformes fecales indica la presencia de otros organismos que pueden resultar peligrosos para la salud. Sin embargo, el origen estrictamente fecal de los coliformes en zonas tropicales ha sido cuestionado por diversos investigadores, ya que se ha encontrado evidencia de sobrevivencia y de actividad en dichas zonas (Vasconcelos y Swartz, 1976; Personné *et al.*, 1998; Carrillo *et al.*, 1985; Perez-Rosas y Hazen, 1988).

En los estudios ambientales de aguas residuales, así como su posible introducción a diferentes ambientes o en la evaluación de calidad del agua en los diferentes sistemas hídricos (superficiales y subterráneos) existe la necesidad de diferenciar las fuentes de alteración y tener un contaminante como único indicador del tipo de actividad que está causando dicha alteración. Uno de los parámetros para determinar la calidad del agua es la bacteria *Escherichia coli*, cuya presencia se relaciona con diferentes actividades antropogénicas (aguas negras, fallos en plantas de tratamiento, descargas de fosas sépticas, descargas de granjas porcícolas, etc.). Sin embargo, vale la pena recalcar que la presencia de esta bacteria no clarifica el tipo de contaminación entre el origen exclusivamente humano o de alguna otra especie presente en el área, como gaviotas, palomas y cerdos (Bartram y Rees, 2000). Recientemente se han empezado a buscar indicadores del tipo orgánico para diferenciar el origen de los patógenos, en este ámbito la cafeína está resultando una herramienta atractiva para distinguir el impacto de la presencia humana como fuente de coliformes (Buerge *et al.*, 2003). En este sentido, la cafeína es uno de los indicadores que se ajusta a la definición de contaminantes emergentes. Éstos se refieren a productos que pueden entrar al ambiente después del uso multiplicado de

individuos y animales domésticos y su subsiguiente descarga en los sistemas de drenaje, o su descarga directa como residuo sólido. Además, al tratarse de un compuesto de entrada consistente al medio y en pequeñas, pero muy determinadas concentraciones y al constituir parte de bebidas como cafés, infusiones (tés), algunas bebidas embotelladas, postres y algunos fármacos de exclusivo uso humano, ha resultado útil para vincular a este compuesto con la contaminación antropogénica (Daughthon y Ternes, 1999; EPA, 2008).

Estudios epidemiológicos recientes han documentado que el riesgo de presentar enfermedades gastrointestinales y de las vías respiratorias se incrementa después de visitas a zonas con aguas recreacionales como playas, lagunas, albercas (Balarajan *et al.*, 1991; Dufour y Ballantine, 1986), por lo que existe la necesidad de diferenciar las fuentes de alteración bacteriológica y tener un compuesto que correlacione la presencia de patógenos con la presencia humana. Por lo que el evaluar la calidad del agua subterránea en la parte noreste del acuífero de Quintana Roo, utilizando indicadores orgánicos (cafeína) que son exclusivamente de uso antropogénico y biológicos (*E. coli*), contribuirá a evaluar el impacto de este tipo de actividades en la vulnerabilidad del agua subterránea.

Numerosos investigadores se han dedicado al estudio de microorganismos patógenos en el agua y su relación con la salud (Bartram y Rees, 2000). Sin embargo, también se ha reportado que los bioindicadores basados en la detección de bacterias fecales, comúnmente utilizados para identificar la presencia de patógenos en playas y centros vacacionales, están asociados con una serie de problemas y limitaciones.

Los microorganismos como fuente de contaminación son muy diversos y se distribuyen en todo tipo de hábitat, incluso en los más hostiles. Aun cuando los métodos de norma son de gran utilidad para el análisis cualitativo y cuantitativo de microorganismos presentes en muestras de agua, para una gestión de calidad de acción rápida no permiten realizar una diferenciación precisa entre las fuentes de origen de esta contaminación.

Los estudios desarrollados en la península de Yucatán relacionados con el impacto humano en el agua subterránea del acuífero han tomado interés en los últimos años (Alcocer *et al.*, 1998; Graniel *et al.*, 1999; Marín *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2001; Beddows *et al.*, 2002; Metcalfe *et al.*, 2009). Especialmente, se han llevado a cabo estudios concernientes al impacto de sustancias orgánicas e inorgánicas en la parte noroeste de la península y, principalmente, en el área conurbada de la ciudad de Mérida (Graniel *et al.*, 1999; Marín *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2000; Pacheco *et al.*, 2001).

Sin embargo, este problema implica que son pocos los estudios reportados en la zona noreste de la península de Yucatán (Alcocer *et al.*, 1998, Beddows, 2002; Hausman, 2009; Metcalfe *et al.*, 2009; Leal-Bautista *et al.*, 2011). El acuífero de la península de Yucatán es un sistema kárstico, con una buena comunicación hidrodinámica, por lo que los contaminantes se infiltran en el sistema debido a la alta permeabilidad y conductividad. Las rocas calizas y los depósitos de litoral de alta permeabilidad y transmisibilidad que constituyen a la península ocasionan fracturas en la roca y esto favorece el flujo de agua, que forma conductos de dilución de diversas magnitudes por donde circula en dirección de la pendiente.

El alto grado de karstificación de la zona promueve una rápida infiltración, ello previene la formación de corrientes superficiales, lo que da lugar a una zona no-saturada de agua que favorece el proceso de disolución. Existen varias formaciones del tipo kárstico en la zona debido a la fluctuación de la tabla de agua que ocurre en esta región; la cual se observa a profundidades de entre 3 y 15 m, en sitios que presentan una elevación de 4 a 20 m. La disolución en fisuras y cavidades produce cavidades mayores, cavernas y colapsos; algunas de ellas relacionadas con la formación de dolinas y cenotes; éstos son los atributos principales de la zona, la cual ha sido considerada como de alta permeabilidad y con condiciones hidrogeológicas especiales (Velázquez, 1995).

Cada día millones de seres humanos consumen una gran variedad de farmacéuticos, ya sea por prescripción o adquiridos sin receta. También están los consumidos en forma inocua a través de alimentos o bebidas, como la cafeína. Diferentes investigaciones en torno a este tema han generado discusiones dentro de la comunidad científica. Durante 1999-2000, el US Geological Survey colectó 139 muestras de agua en 30 estados de la Unión Americana y encontró que el 80% de estas muestras presentaban contaminantes orgánicos, tales como farmacéuticos. Kolpin y colaboradores (2000) indican que varios compuestos fueron encontrados en estas muestras con un promedio de siete. Muchos de estos compuestos han llegado por descargas a los sistemas hídricos superficiales y subterráneos de plantas de tratamiento donde pueden encontrarse parcialmente degradados, o bien, han permanecido sin cambio alguno (Xia *et al.*, 2005). En áreas rurales, la descarga de aguas que contienen farmacéuticos llega a ser vertida directamente vía fosas sépticas. Un estudio en Montana encontró que numeroso compuestos de origen farmacéutico se habían localizado en el efluente de tanques sépticos, algunos de los cuales han llegado a impactar el acuífero local (Godfrey *et al.*, 2007). En el estado de Yucatán se han realizado estudios de contaminación bacteriológica en el acuífero, Pacheco *et al.* (2000) reportaron altas densidades de coliformes totales y fecales (7320 a 12989 NMP/100 mL) en el agua

subterránea de Yucatán, indicando que la posible fuente de esta actividad microbiana, en las muestras colectadas al norte de la ciudad de Mérida, puede estar relacionada con la infiltración de los lixiviados de desechos humanos y animales de las zonas rurales. Pacheco (2001) postula que la infiltración en época de lluvia se incrementa con la contaminación que se detecta en el acuífero de la península.

En el estado de Yucatán, la demanda del recurso agua no es el aspecto más vulnerable, la problemática surge por las características naturales del acuífero y el deterioro en la calidad del agua. Dos aspectos resaltan en la evaluación de dicha vulnerabilidad: el primero consta porque los ecosistemas son dependientes de la calidad del agua, y en segundo lugar, porque el acelerado desarrollo de las actividades humanas tiene una mayor tendencia a la transformación ambiental. El turismo se ha convertido en una fuerza económica a nivel mundial, en crecimiento, en especial en la península de Yucatán. El Plan Estatal de Desarrollo 2012-2018 del Estado de Yucatán contempla el turismo como un sector productivo de primer orden, que contribuye al desarrollo social y económico de Yucatán; asimismo, ya se plantea establecer el Programa de Desarrollo Sustentable Turístico.

La Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente del Estado de Yucatán (SEDUMA) refiere 103 cenotes con un potencial turístico en el estado. En éstos, la necesidad principal es mejorar el manejo de los recursos naturales, reducir el impacto y proveer de la información necesaria para la promoción de buenas prácticas turísticas, sobre todo en aquellas áreas de alta biodiversidad.

Por otro lado, el estado de Quintana Roo, ubicado al este de la península de Yucatán, colinda con los estados de Yucatán, hacia el noroeste, y Campeche al oeste; está conformado por dos regiones hidrológicas: Yucatán Norte (RH 32), que comprende la zona norte del estado y donde los recursos hidráulicos son solamente subterráneos; y Yucatán Este (RH 33), que abarca el resto del estado. La región hidrológica 32 cuenta con la cuenca denominada Quintana Roo, comprende la parte norte del estado, y su disponibilidad 1944 mm^3 (CONAGUA, 2009). Es notorio que el producto interno bruto de Quintana Roo refiere un porcentaje mayor al 90% vinculado con las actividades turísticas, lo cual promueve el crecimiento poblacional, un factor de estrés en los objetivos de distribución del agua potable en el estado, en especial para la zona norte, en la cual se localizan los municipios con mayor crecimiento y actividad turística.

En este capítulo se exponen dos trabajos referentes a la identificación de fuentes de contaminación, así como una evaluación de la calidad del agua en los diferentes sistemas hídricos (superficiales y subterráneos). Existe la necesidad de diferenciar las fuentes de alteración y evaluar el impacto que generan en la biodiversidad de un ecosistema, así como la posibilidad de cuantificar dicha alteración.

El caso de Puerto Morelos, Quintana Roo

Dada la magnitud de la actividad turística en el estado de Quintana Roo, se seleccionaron muestras de agua subterránea de la Zona Riviera Maya (zona noreste de la península de Yucatán) en la denominada *Ruta de los cenotes*, donde el turismo se caracteriza por el desarrollo de actividades acuáticas recreativas. Aplicando el análisis de multirrastreo, se reportó la presencia de cafeína relacionada con la infiltración de los desechos humanos en estas áreas. Este estudio permitió verificar el origen de la fuente contaminante mediante la detección de la presencia de compuestos del tipo farmacéutico.

Puerto Morelos, Quintana Roo, se localiza en las coordenadas Latitud 21°22'-20°43'N, longitud 86°44'-87°19' O. Los ecosistemas preponderantes son los manglares, dunas y selva. Hidrogeológicamente, la zona de Puerto Morelos es muy semejante al resto de la península de Yucatán, ya que no dispone de corrientes superficiales debido a la permeabilidad del suelo kárstico y topografía. Se distinguen desembocaduras hacia el mar, observándose zonas de inundaciones en algunos puntos de la franja costera con suelo de origen lacustre; en Puerto Morelos una de estas zonas inundables ocupa una porción importante de los terrenos. En los extremos norte y sur de Puerto Morelos se presentan depresiones que almacenan agua precipitada durante la época de lluvias, llegando a repercutir en la zona de dunas costeras mediante pequeños canales, hasta desembocar sus excedentes en el mar. Una corriente de flujo subterráneo llega directamente desde la subcuenca Central Vallarta, a unos 35 kilómetros al oeste de la costa, a través de conductos de disolución y cavernas subterráneas que desembocan en paleobermas y en surgencias en el humedal y en manantiales submarinos (SEDUMA, 2008).

En la **Tabla 1** se muestran condiciones fisicoquímicas reportadas en muestras colectadas de siete sitios de Puerto Morelos (**Figura 1**). En el punto P6 (cenote sin actividad) la demanda química de oxígeno (DQO) total y soluble tienden a cero y el resultado de sólidos suspendidos totales (SST) fue de 182 mg/L, lo cual indica que la actividad microbiana está limitada debido a la presencia de sólidos, que en este caso puede estar relacionada con los carbonatos disueltos del material geológico. Por lo anterior, el sitio P6 fue tomado como referencia, ya que es un cenote que no tiene relación con la actividad turística de la zona. Para los puntos P3 y P5, los resultados de DQO total y soluble presentaron un panorama diferente. El punto P3 presenta valores muy similares de DQO total y soluble (10.5 y 11 mg/L respectivamente) y el valor de SST (17 mg/L) se considera bajo, lo cual indica condiciones favorables a la actividad microbiana. Para el punto P5, se observó que los valores de DQO total (14 mg/L) y soluble (9 mg/L), así como el respectivo resultado de SST (12 mg/L) también fueron favorables a la actividad microbiana, como lo indican los resultados bacteriológicos.

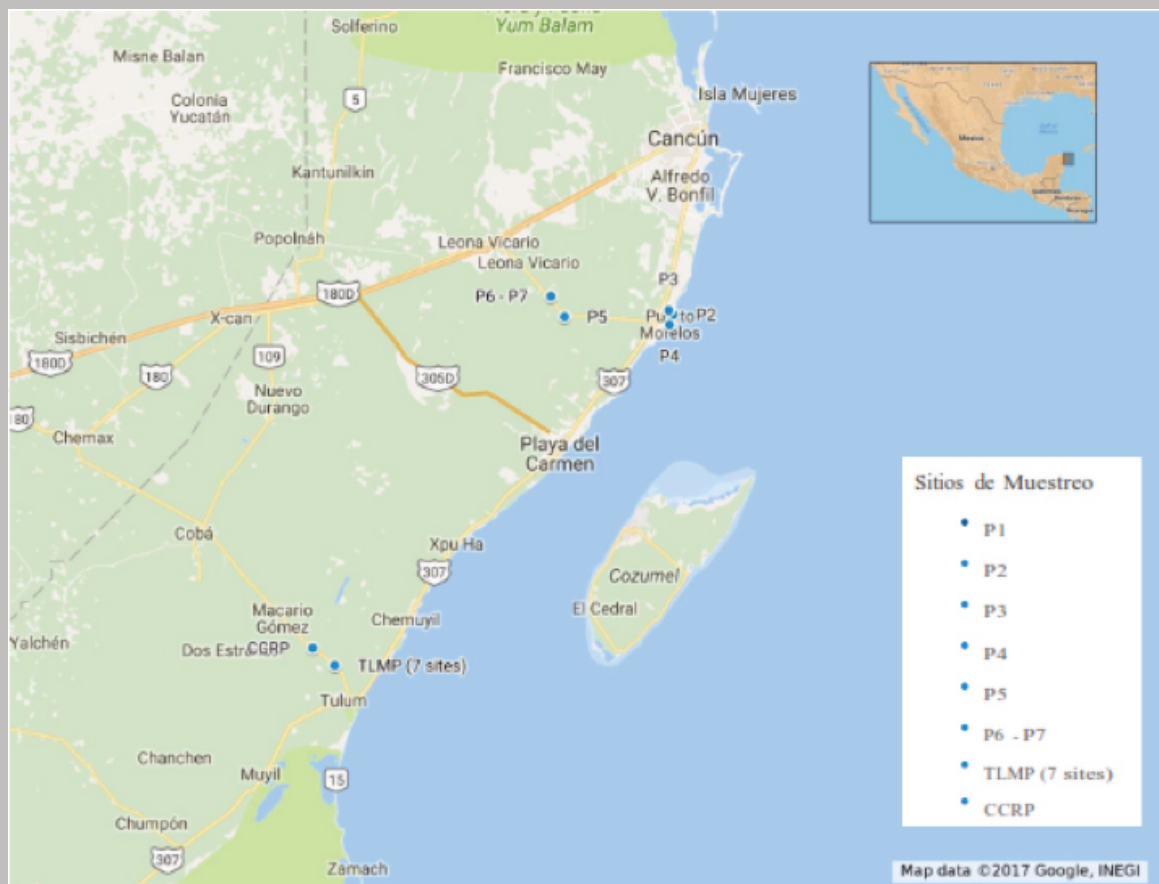


Figura 1. Se muestra la ubicación de los sitios de muestreo. Los sitios P1 y P2 se encuentran a menos de 200 m de distancia, al igual que P6 y P7, y los siete sitios agrupados en TLMP.

Tabla 1. Condiciones fisicoquímicas en aguas subterráneas de Puerto Morelos.

Parámetros/Código	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
DQO (mg/l)	9	11	10.5	103.5	14	3	0
Nitrógeno Total (mg/l)	0	4	0	0	0	0	0
Nitratos (mg/l)	3.1	0.55	1.25	0.4	0.75	0.6	1
Nitritos (mg/l)	2	1	2	1	1	1	1.5
Fosfatos (mg/l)	0.55	0.4	1.05	0.4	0.4	0.3	0.35
Sólidos Totales (mg/l)	838	1008	983	2228	772	407	672
Sólidos Fijos (mg/l)	703	747	837	1965	608	378	647
Sólidos Volátiles (mg/l)	135	262	147	263	163	28	25
Sólidos Suspendidos Totales (mg/l)	8	33	17	105	12	182	22
Sólidos Suspendidos Fijos (mg/l)	15	12	13	27	7	173	13
Sólidos Suspendidos Volátiles (mg/l)	0	22	3	78	5	8	8
Sólidos Disueltos Totales (mg/l)	830	975	967	2123	760	225	650

Además se utilizaron parámetros bacteriológicos para relacionar las condiciones de calidad del agua al uso consuntivo y la cafeína como indicador de la presencia de actividad antropogénica (**Tabla 2**).

Tabla 2. Indicadores bacteriológicos conforme al método de filtración por membrana NMX y cafeína por medio de cromatografía HPLC con UV (ThermoFinnigan Spectra System-UV2000) usando un columna a CP10-10 cm con metanol/agua 35/65, 1 mL/min flujo, 50 uL de inyección muestra y el UV detector a 295 nm (método modificado de Cavazos et al., 2001).

Código	Coliformes totales	E. coli	Cafeína
	NMP/100 mL	NMP/100 mL	Presencia/Ausencia
P ₁	206.4	10	A
P ₂	6.3	0	A
P ₃	143	31	P
P ₄	93.2	0	A
P ₅	298.7	85	P
P ₆	4.1	0	A
P ₇	49.6	0	A

Los análisis bacteriológicos indican la afectación de la calidad microbiana del agua, con presencia persistente de coliformes en todos los sitios y de *E. coli* sólo en tres de siete. Debido a que *E. coli* es un indicador referente al fecalismo, se le puede asociar con la posibilidad de que otros patógenos fecales transmitidos por agua estén presentes, incrementando así el potencial para afectar la salud pública; sin embargo, la sola presencia de *E. coli* no es exclusiva de una fuente antropogénica. Es por ello que al conjuntar estos resultados con la presencia o ausencia de un indicador específico, en este caso cafeína, se pueden distinguir aquellos sitios donde el origen de la afectación bacteriológica es proveniente de la actividad humana (P₃ y P₅). Conociendo el contexto social de dichos sitios, se puede relacionar directamente con actividades recreativas y, probablemente, con aquellas vinculadas al manejo de residuos sólidos urbanos de la misma zona. Geográficamente la presencia de contaminación fecal ha sido reportada extensamente en sitios dentro del área turística de toda la península de Yucatán; como el área urbana continúa expandiéndose a una velocidad mayor que la que el gobierno es capaz de proveer servicios básicos de manejo de residuos sólidos y alcantarillado (Calderón y Orozco, 2009), aunado al aumento anual del número de turistas que se reciben, especialmente en el estado de Quintana Roo (Medina-Moreno et al., 2014), existe un incremento en el potencial de este tipo de contaminación.

El caso de Tulúm, Quintana Roo

En la zona de Tulúm, el análisis multirrastreo se aplicó a una serie de pozos de extracción que abastecen a la población, donde el área de distribución no está delimitada y ya se tienen asentamientos humanos muy cercanos. De 2008 a 2012, se recogieron muestras de agua subterránea durante la baja turística y temporada de lluvias (mayo, junio, agosto y octubre), y de estiaje (diciembre, enero, marzo o julio). Los lugares de muestreo incluyen 11 pozos (nueve suministros municipales de agua y dos pozos privados) y un cenote (sumidero, **Figura 1**). Los dos pozos privados (TLMZrq y CCRP) se encontraban en el interior y no fueron afectados por el desarrollo costero. Los pozos municipales (TLMP 1-7 y CCRP-BBPT4) fueron afectados por el desarrollo urbano, ya que se encuentran construcciones cerca de los pozos y sus zonas de recarga, incluso un sitio abandonado donde se manejaba pollo. En cada sitio se recolectaron muestras para análisis de coliformes totales y *E. coli*. Las muestras fueron analizadas usando el Colilert™ de IDEXX y IDEXX Quanti-bandeja/2000 como método cromogénico equivalente al recomendado por la American Public Health Association (APHA) y avalado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA, por sus siglas en inglés).

Las condiciones fisicoquímicas para estos sitios mostraron la variación característica correspondiente al incremento de lluvias o a la época de estiaje. En el caso de la zona de Puerto Morelos, los resultados mostraron una tendencia al incremento de microorganismos durante los meses de verano, asociada al incremento de escorrentías por lluvias y bajos niveles de contaminación microbiana durante la estación de estiaje. Sin embargo, la variación de estos resultados indica que la contaminación fecal es extensa, variable y muy relacionada con la presencia de microorganismos activos en los sedimentos arrastrados por la infiltración. Sin embargo, la presencia de cafeína fue confirmada en los pozos de abastecimiento, en especial en aquellos donde existe presencia de desarrollos en la zona de recarga.

Tabla 3. Descripción de los sitios de colecta.

Código	CAPA/Privado	Protección	Ademe	Activo	Flujo (litros/min)
TLMP1	CAPA	SIN PROTECCIÓN	Sí/PVC	no	
TLMP2	CAPA	PROTEGIDO	Sí/PVC	Sí	1000
TLMP4	CAPA	PROTEGIDO	Sí/PVC	Sí	1000
TLMP5	CAPA	PROTEGIDO	Sí/PVC	Sí	1000
TLMP6	CAPA	PROTEGIDO	Sí/PVC	Sí	1000
TLMP7	CAPA	PROTEGIDO	Sí/PVC	Sí	1000
BBPT4	PARTICULAR	PROTEGIDO	Sí/PVC	no	
CCRP	PARTICULAR	PROTEGIDO	No	no	

Tabla 4. Detección de cafeína, junio de 2008 (*por debajo de la tabla de agua).

Código	Cafeína (mg/L)
TLMP (1 m*)	3.55
TLMP 1 (6 m*)	3.39
TLMP2 (toma de pozo)	0.52
TLMP5 (toma de pozo)	0
TLMP7 (toma de pozo)	0
CCRP (4 m*)	0
BBPT4 (toma de pozo)	0

Con los resultados de la **Tabla 4**, podemos comprobar que las técnicas de multirrastreo no solamente permitieron identificar la presencia de compuestos emergentes, como la cafeína en el agua subterránea de la zona, además permitieron comprobar que su presencia en pozos de agua es exclusivamente antropogénica y podemos relacionarla con las actividades que se llevan a cabo alrededor de los mismos.

Reflexiones finales


La península de Yucatán está sujeta a una alta presión de uso y explotación de sus recursos naturales, como es el caso del agua, siendo por ende relevante la presente propuesta, ya que son pocas las investigaciones que abordan aspectos funcionales en ecosistemas en donde se caracterizan las diferencias naturales y las condiciones ambientales. Y no son sólo los compuestos de origen industrial o los relacionados con las descargas de aguas negras los que están afectando las condiciones del agua subterránea, también los contaminantes emergentes como la cafeína se están haciendo presentes en el sistema, así como los productos orgánicos denominados PPCPs (productos de cuidado personal y farmacéuticos, por sus siglas en inglés), clasificados como contaminantes relacionados con actividades humanas, en concentraciones muy pequeñas, pero de entrada constante.

Estas sustancias, generalmente, se refieren a productos que pueden entrar al ambiente después del uso multiplicado de individuos y animales domésticos y su subsiguiente descarga en los sistemas de drenaje, o su descarga directa como residuo sólido (Daughton y Ternes, 1999; EPA, 2009). En algunos casos, su vida útil termina en plantas de aguas residuales y confinamientos o rellenos sanitarios. Sin embargo, una sobrecarga en plantas de tratamiento o el desbordamiento por lluvia o infiltración de lixiviados pueden afectar directamente los sistemas subterráneos. Además, no han sido evaluados los efectos ecológicos que este tipo de contaminantes puedan provocar.

Si la cafeína está presente en el agua, muchos otros productos farmacéuticos y productos de cuidado personal podrían estar presentes. El análisis de la ocurrencia de estos compuestos similares en el sistema subterráneo, así como su distribución espacial, permitirían tener una idea del grado de impacto que se está presentando en el sistema hidrogeológico de la península de Yucatán. Se necesitan investigaciones futuras para establecer no sólo la aparición/ocurrencia, sino también la magnitud de esta contaminación de las aguas residuales y los efectos potenciales que se pueden estar presentando ya en los ecosistemas costeros, lo que también puede significar un riesgo a las actividades económicas como el turismo.

Los cenotes son comúnmente usados por turistas y locales para actividades recreativas, especialmente nado y clavados; pero es importante hacer notar que también la población los utiliza como conexiones de descarga de aguas residuales sin tratar o de salidas de fosas sépticas y, en el mejor de los casos, como área de inyección de plantas de tratamiento. Debemos recordar que los cenotes son parte del sistema hidrogeológico y que están directamente conectados con el recurso hídrico de la península de Yucatán. La disposición de los investigadores de las diferentes instituciones de investigación y educación en la península, así como la infraestructura que los respalda, con la existencia de equipos de laboratorio altamente especializados, permiten que estos estudios y diagnósticos se puedan realizar con resultados precisos y metodologías validadas, que contribuyan en la definición de estrategias de control y políticas de protección.



 *Cenote Kanún, ubicado en la cercanía del poblado de Homún, Yucatán. Su acceso se realiza mediante rapel. En las paredes de este cenote se pueden encontrar muchos fósiles de equinodermos y algunos restos óseos de otros animales. Buzo: Juan Baduy. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Capítulo 13

Contaminación del agua en el Anillo de Cenotes: escenario sociocultural, ambiental y político

Ángel G. Polanco-Rodríguez,¹ Alfredo Araujo León²

¹Centro de Investigaciones Regionales de la
Universidad Autónoma de Yucatán, México

²Laboratorio de Cromatografía de la Facultad de Química
de la Universidad Autónoma de Yucatán



Introducción

Si de actores en la península de Yucatán se trata, entonces las comunidades agrícolas mayas resultan ser uno de los más ancestrales. Su presencia en el estado de Yucatán se ha visto inmersa por un contexto sociocultural, medioambiental y político sumamente particular, por lo cual el análisis de sus procesos históricos deben gestarse a través de la óptica de cada una de las esferas involucradas, así como las interacciones entre éstas.

El Consejo Nacional de Población, CONAPO (2010), asevera que las comunidades mayas del sureste de México se han (sub) desarrollado en escenarios de pobreza y pobreza extrema, caracterizados por un bajo nivel educativo y alto analfabetismo, aunado al hecho de que éstas comunidades son altamente dependientes de pequeños insumos, destacando a los agroquímicos (tales como los pesticidas organoclorados), suministrados sin programas de capacitación ni de promoción de la salud, bajo una construcción social indigente necesaria de transformar, pero difícil de construir cuando las partes oficialistas gubernamentales no aplican las bases para iniciar un desarrollo social, ambiental y económico legalmente aceptables.

Por su persistencia, bioacumulación y efectos adversos al ser humano, la presencia de pesticidas organoclorados (OCP) en el ambiente resulta problemática. En el sector salud, estos contaminantes cobran relevancia por sus efectos mutagénicos y carcinogénicos para los seres humanos: diversos estudios documentan problemas de cáncer de endometrio, mama y útero (Carvalho, 2006; Thakur *et al.*, 2008; Tabrez y Ahmad, 2009; Jung-Ho y Yoon-Seok, 2011; Mrema *et al.*, 2013; Tabrez *et al.*, 2014).

Además, cabe mencionar que la geología kárstica, la densidad de dolinas (4000 a nivel estatal), las fallas fisiográficas y los suelos poco profundos y pedregosos de Yucatán, así como los procesos de deforestación que actualmente experimenta el estado, facilitan la infiltración y movilidad de los contaminantes en el agua, configurando así una mayor vulnerabilidad a la contaminación (Durán y Méndez, 2010; INEGI, 2010; Rohrer, 2012; Aguilar-Duarte *et al.*, 2016).

El contexto anterior indica que nuestro acuífero kárstico yucateco es altamente vulnerable a la contaminación, por lo cual debe ser considerado de alta fragilidad y tener un buen manejo en cuanto a programas de monitoreo para medir los contaminantes en el agua, asegurando que los valores límites permitidos por las normas internacionales no sean rebasados (IUPAC, 2003). Sin embargo, a pesar de la extrema vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco, el sector oficial no se ha ocupado de implementar infraestructura para el saneamiento hídrico, encontrándose Yucatán en el último lugar nacional en este rubro (CONAGUA, 2015).

El objetivo de este capítulo es describir los más altos niveles de OCP detectados en la zona del Anillo de Cenotes y en particular de lindano, en el marco de un escenario multifactorial que contribuye a la contaminación del agua, elevando los impactos a la salud pública y al medio ambiente en la principal reserva de agua superficial de la zona maya, así como en su acuífero subterráneo en Yucatán, México.

La fragilidad natural del paisaje en Yucatán

De acuerdo con un reciente estudio sobre el índice de la vulnerabilidad del acuífero a la contaminación, se identificó que el Anillo de Cenotes y la zona norte del estado de Yucatán presentan un nivel extremo de vulnerabilidad a la contaminación del agua subterránea, donde predominan dolinas en contacto con el acuífero y suelos como los leptosoles, ocupando el 19% de la superficie estatal. Esto nos indica el nivel de vulnerabilidad y riesgo extremo en que se encuentra la Reserva Geohidrológica en el estado de Yucatán, así como la imperante necesidad de tomar acciones que conduzcan a su cuidado y preservación. La fácil filtración hacia los conductos y cavidades subterráneas permiten la distribución de contaminantes desde la superficie por el uso de agroquímicos hacia el acuífero subterráneo, debido a sus suelos altamente permeables (Marín y Perry, 1994; Escolero *et al.*, 2000; Marín *et al.*, 2000; Escolero *et al.*, 2002). Por otra parte, existen fallas y fracturas en la superficie del suelo, que facilitan el filtrado de contaminantes al agua subterránea, así como el 30% de la deforestación en Yucatán, lo que aumenta el proceso de vulnerabilidad para la contaminación del agua (Andrade, 2010; INEGI, 2010).

Otro problema trascendental reciente (2017-2018) es que en el municipio de Homún, Yucatán, ubicado en la región centro del estado, en el área de recarga del Anillo de Cenotes, se pretende instalar una granja para producir 50000 cerdos al año, lo cual plantea un riesgo potencial para la salud pública y el medio ambiente de las comunidades mayas. Los cenotes de Homún representan uno de los mayores atractivos turísticos del estado, siendo así que cerca de la mitad de sus habitantes (47%) se dedican a actividades relacionadas con el ecoturismo.

La Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH) reitera la importancia del acceso al agua y al saneamiento como un derecho humano que es inherente a la satisfacción de las necesidades básicas y al bienestar de la población. Este derecho se encuentra previsto en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos y en diversos tratados internacionales en los que México es parte, los cuales constituyen un amplio marco de reconocimiento y protección convencional del mismo. Aunado a ello, en el ámbito jurisdiccional de los derechos humanos existen varios pronunciamientos en la materia por parte de la Suprema Corte de Justicia de la Nación y de la Corte Interamericana de Derechos Humanos. También existen diferentes

directrices orientadoras emanadas de organismos internacionales que no deben pasar inadvertidas para el Estado Mexicano.

Estudios en el estado de Yucatán, México

En Yucatán, México, se han realizado estudios para medir los niveles de concentración de OCP (DDT, heptacloro, lindano, endosulfán, aldrín, dieldrín y endrín) en agua, su bioacumulación en sangre de mujeres mayas con cáncer cervicouterino y en leche materna. Los resultados presentan muy altos niveles de OCP en muestras de agua y muestras humanas. Como se ha descrito, este problema de alto impacto al ecosistema y al ser humano se debe a varios factores importantes, en gran medida a la falta de aplicación de la legislación ambiental y nula consulta a las comunidades indígenas con el debido proceso y respeto a sus derechos humanos, a la falta de capacitación de los agricultores y a los bajos niveles educativos.

Asimismo, estos plaguicidas han sido reportados como disruptores endocrinos en la literatura científica, que pueden asociarse a diversos cánceres en el ser humano, con afectaciones al aparato reproductivo femenino y masculino, malformaciones congénitas, afectaciones al sistema nervioso central, retraso cognitivo, muerte fetal e infantil, entre otras enfermedades. Es importante recordar que el estado de Yucatán ha mantenido altas tasas de mortalidad por cáncer en mujeres y malformaciones congénitas, por arriba de la media nacional, 20 años atrás (SSY, 2006). En Yucatán, la tasa promedio de mortalidad de cáncer cérvicouterino fue de 29.02/100000 durante el período 1990-2005 (SSY, 2006). Durante 2006-2010, Yucatán fue el segundo lugar con mayor mortalidad, con 94 muertes en 2010 (SSY, 2011).

El cáncer es una enfermedad en donde se relacionan interacciones genéticas y del medio ambiente, asimismo, los contaminantes ambientales aumentan el riesgo de padecer diversos tipos de cáncer (Tabrez *et al.*, 2014). Los humanos están expuestos a muchos carcinógenos ambientales. La prevalencia creciente del cáncer es en parte atribuible a la exposición a agentes carcinogénicos en el trabajo ocupacional (Soffritti *et al.*, 2008). La interacción gen-medio ambiente (GEI, por sus siglas en inglés) se refiere a las influencias combinadas de los factores genéticos y ambientales en el proceso de la enfermedad de salud (Tabrez *et al.*, 2014).

El estudio de OCP en agua del Anillo de Cenotes (**Figura 1**) tuvo como objetivo evaluar sus niveles y potenciales riesgos a la salud y al medio ambiente (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015a).

Los resultados muestran altas concentraciones en el área de recarga que comprende municipios del centro del Anillo y en las áreas de descarga hacia el Golfo de México, hacia el noreste (más de 13 ppm de heptacloro y más de 10 ppm de lindano) y noroeste del anillo.

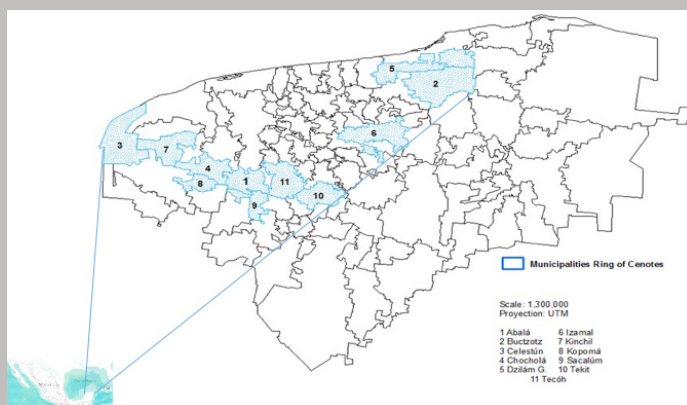


Figura 1. Estudio de OCP en 11 municipios del Anillo de Cenotes (Polanco-Rodríguez et al., 2015).

La frecuencia de detección mostró un 100% para heptacloro, un 95% para α -lindano y δ -lindano, un 80% para endrín aldehído, un 75% para 4,4'DDD. El estudio sociocultural mostró que el 30% de las comunidades beben agua de pozos y cenotes contaminados, siendo una vía para la exposición crónica y desarrollo de cánceres (Polanco-Rodríguez et al., 2015b).

En relación con los Límites Máximos Permitidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y las Normas Internacionales de Límites Máximos Permitidos de residuos de OCP, se observa que la NOM mexicana no es estricta (**Tabla 1**).

Tabla 1. Límites máximos permisibles para pesticidas organoclorados y sus residuos en agua potable.

Pesticida	México	EPA ppm	Australia ppm	OMS ppm	EE.UU. ppm
Endosulfán		0.0003	0.00005	-	0.0001
Lindano	2	0.0002	0.00005	0.002	0.0001
Heptacloro	0.03	0.0004	0.00005	3E-05	0.0001
Aldrín	0.03	0.002	0.00001	3E-05	0.0001
Dieldrín	0.03	0.002	0.00001	3E-05	0.0001
Endrín	0.03	0.002	0.00001	3E-05	0.0001
DDT	1	*	0.00006	0.002	0.0001
Metoxicloro	20				

México: NOM-127-SSA1-1994

EPA: Environment Protection Agency, USA (EPA, 2009)

Australia: (IUPAC, 2003)

WHO: World Health Organization (IUPAC, 2003)

EU: European Union. Drinking Water Directive (IUPAC, 2003)

México: <http://www.cofepris.gob.mx/MJ/Documents/Normas/mod127ssa1.pdf>

Un total de 324 detecciones fueron realizadas, identificándose 14 OCP y sus metabolitos. La **Tabla 2** muestra la frecuencia de detección, rango de concentración, media y el límite de detección durante la época de lluvias y secas. Todas las concentraciones detectadas en el Anillo de Cenotes (324) fueron más elevadas que los límites máximos permitidos por la NOM mexicana y más elevados aún que las normas internacionales.

Tabla 2. Frecuencia de detección, rango de concentración, media y límite de detección de pesticidas organoclorados.

Pesticida	Epoca de Lluvias (n=20)			Epoca de secas (n=20)			
	Frecuencia de detección (%)	Range (ppm)	Media (ppm)	Frecuencia de detección (%)	Range (ppm)	Media (µg/L)	Límite de detección
a-endosulfán	45	ND - 0.144	0.016	40	ND - 0.457	0.033	0.096
b-endosulfán	40	ND - 0.29	0.027	35	ND - 0.135	0.014	0.070
Dieldrín	80	ND - 0.52	0.059	20	ND - 0.045	0.003	0.061
4,4'DDE	80	ND - 0.846	0.081	70	ND - 1.255	0.112	0.226
4,4'DDD	75	ND - 0.113	0.017	75	ND - 0.417	0.109	0.232
Endrín	50	ND - 2.567	0.248	50	ND - 3.265	0.359	0.065
Endrín aldehído	95	ND - 0.941	0.12	80	ND - 0.245	0.068	0.115
Endosulfán sulfato	75	ND - 0.134	0.024	55	ND - 0.253	0.036	0.073
4,4'DDT	60	ND - 0.112	0.016	70	ND - 0.235	0.032	0.309
Heptacloro	70	ND - 0.918	0.421	100	ND - 13.617	2.804	0.090
a-lindano	ND	ND	ND	95	ND - 6.538	0.639	0.093
b-lindano	ND	ND	ND	75	ND - 0.924	0.100	0.071
g-lindano	10	ND - 0.794	0.044	80	ND - 5.233	1.511	0.078
d-lindano	ND	ND	ND	95	ND - 10.864	0.462	0.087

Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015. Límite Máximo Permitido en ppm: heptacloro 0.03; aldrín 0.03; dieldrín 0.03; endrín 0.03; DDT 1.0; lindano 2.0 (Mexican Norm: NOM-127-SSA1, 1994).

Asimismo, estudios relevantes han detectado altos niveles de metales (Árcega *et al.*, 2017), contaminación por heces fecales (Long *et al.*, 2018), involucrando un alto impacto para la salud pública y el medio ambiente.

Por otra parte, en la zona de mayor concentración de cenotes de Yucatán, la región ganadera, en el municipio de Tizimín en particular, área catalogada como de vulnerabilidad extrema al acuífero por el índice IVAKY (2017), mostró la más alta bioacumulación de OCP en sangre de mujeres con cáncer cérvicouterino, detectándose para endosulfán, 7.35 mg/mL; aldrín, 3.69 mg/mL; 4,4'DDD, 2.33 mg/mL, y heptacloro 1.43 mg/mL (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2017b) (**Figura 2**). En esta zona de alta bioacumulación de plaguicidas en sangre de mujeres mayas, también se detectó la más alta concentración de plaguicidas en el "anillo de cenotes", en el municipio de Dzilam González (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015).

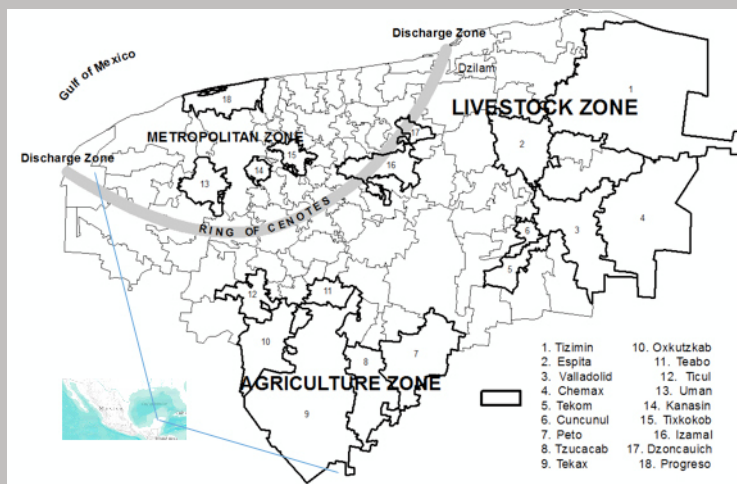


Figura 2. Estudio de los pesticidas en sangre de mujeres con cáncer en 18 municipios en la zona agrícola, pecuaria y metropolitana del estado de Yucatán (Polanco-Rodríguez, 2017b).

Resultados de lindano en el Anillo de Cenotes

Con la excepción de un cenote en la zona de estudio del anillo, los metabolitos de lindano se encontraron en todos los municipios (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015). Las más altas concentraciones de lindano se dieron nuevamente en cenotes del municipio de Dzilam González (10.86 ppm de δ -lindano), zona de descarga en la punta noreste hacia el Golfo de México, así como en la zona de recarga hacia el centro del Anillo en el municipio de Tecoh (6.53 ppm de α -lindano), precisamente en la zona decretada para la conservación del Anillo de Cenotes, y en la zona de descarga en Celestún (4.100 ppm de δ -lindano, 2.56 ppm de γ -lindano) (Tabla 3).

El lindano es más soluble en agua que otros OCP y tiende a permanecer en la columna de agua (Sang *et al.*, 1999). El lindano es catalogado como neurotóxico, hepatotóxico, inmunotóxico, con efectos adversos en el sistema reproductivo y de desarrollo en animales de laboratorio (ATSDR, 2005). El lindano es un compuesto organoclorado persistente y altamente resistente a la degradación ambiental, capaz de transportarse a grandes distancias y bioacumularse en tejidos animales y humanos, siendo extremadamente tóxico. También se ha demostrado que el lindano se bioacumula en el tejido adiposo de los organismos y se biomagnifica a lo largo de la cadena alimentaria (Sandu y Virsta *et al.*, 2015). El vertido agrícola y las descargas de fuentes puntuales son la principal ruta de contaminación del γ -HCH al agua superficial (Donald *et al.*, 1997).

El lindano, como parte de la familia de plaguicidas organoclorados, actúan como disruptores endocrinos, es decir, son químicos ambientales que, a ciertas dosis, interfieren con el sistema endocrino del ser humano, lo cual implica la alteración de la homeostasis que inducen defectos de nacimiento, efectos feminizantes y tumores cancerosos. Los disruptores endocrinos interfieren con la síntesis, transporte, almacenamiento, uniones químicas y actividades naturales de las hormonas, y pueden asociarse a procesos cancerígenos (Van Maele Fabry *et al.*, 2006; Famigliini *et al.*, 2008; Mnif *et al.*, 2011; Brophy *et al.*, 2012).

La exposición a estos químicos para los organismos en el período intrauterino en el que se produce un daño sustancial al feto representa el riesgo ambiental u ocupacional de desarrollar cáncer (Karoutsou *et al.*, 2017).

Tabla 3. Resultados de concentraciones de lindano en época de secas.

Municipio-Cenote	Pesticide (ppm)			
	α -lindano	β -lindano	δ -lindano	γ -lindano
Abalá-Kankirixche	0.008	0.008	0.042	0.006
Buctzotz-Chen V.	0.079	0.065	1.275	0.044
Buctzotz-Itzincab	0.077	0.067	1.375	0.04
Celestún-Sabtun	0.938	0.391	4.1	2.568
Celestún-Chunchucmil	ND	ND	ND	ND
Chocholá-Yax Ha	0.123	0.005	0.034	ND
Dzilam-Xlabon	0.042	0.008	0.143	0.063
Dzilam-Dzonot T.	0.829	0.924	2.126	0.919
Dzilam-Xkanha	2.757	0.071	10.864	0.1
Izamal-X'kolac	0.094	ND	0.138	0.019
Kinchil-Xelactun	0.228	ND	0.319	ND
Kopomá-Chen Ha	0.089	0.411	0.539	0.1
Sacalum-Sabak Ha	0.04	0.011	0.192	0.028
Tekit-Xpakay	0.053	0.002	0.062	0.019
Tekit-Luum Ha	0.023	0.013	0.186	ND
Tecoh-Nayah	6.538	ND	3.775	5.233
Tecoh-Noria	0.207	0.032	0.094	0.007
Tecoh-Tanimax	0.474	ND	4.867	0.089
Tecoh-Chonkila	0.098	0.004	0.051	0.004
Tecoh-Telchaquillo	0.098	0.004	0.051	0.004

El Centro Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés) (2017) establece al lindano en la clasificación 1, cancerígeno humano. El lindano puede ser medido como bioindicador en agua, orina, sangre, leche materna (Tabla 3).

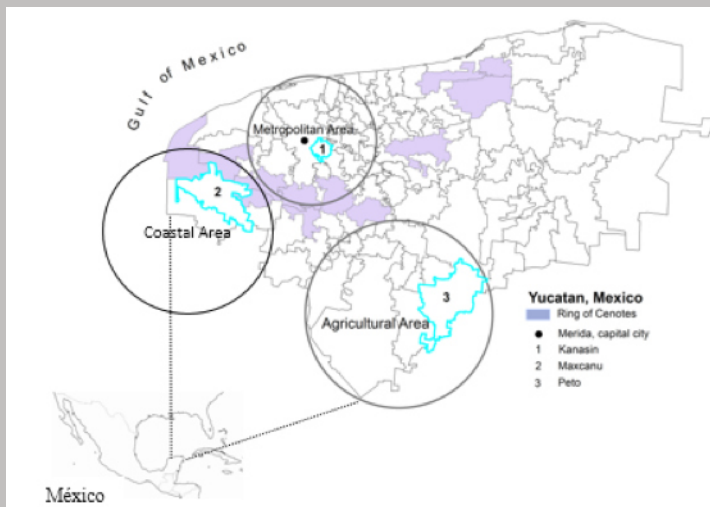


Figura 3. Estudio de pesticidas en leche materna: (1) Área metropolitana: Kanasín. (2) Zona Costera: Maxcanú, y (3) Zona agrícola: Peto. (Polanco-Rodríguez et al. 2017b).

La presencia de residuos de OCP en biomarcadores humanos, como la leche materna o la sangre, indica exposición crónica durante años, generalmente por actividades agropecuarias. Se han estudiado durante años en muchos países, sin embargo, los estudios en América Latina son escasos (Rojas-Squella *et al.*, 2013). En las mujeres, los OCP ingresan al cuerpo por vía oral, dérmica y nasal, y se excreta a través de la leche materna durante la lactancia, representando la principal ruta de bioacumulación de OCP en recién nacidos (Botella *et al.*, 2004; Dahmardeh *et al.*, 2009). La exposición temprana a OCP durante el período neonatal afectan el neurodesarrollo del niño (Liu & Schelar, 2012), así como otros efectos adversos, como el bajo peso al nacer y retraso cognitivo en la niñez (Díaz-Barriga, 2003; Ribas-Fitó *et al.*, 2003; Sharpe & Irvine, 2004). En el estado de Yucatán, la comunidad maya tiene una de las tasas más altas de pobreza en México, junto con una alta tasa de marginación de 0.423 (CONAPO, 2011). Las mujeres mayas generalmente cultivan verduras y frutas, crían pequeñas especies como cerdos y aves de corral en su patio trasero para el autoconsumo familiar, usando estos productos químicos cancerígenos (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015b).

El punto de vista de las comunidades mayas

Resulta fundamental analizar el punto de vista de la población maya respecto el uso de agroquímicos y de los impactos en el medio ambiente y la salud pública. Lupton (1999) ha llamado a la subjetividad del riesgo a *las formas en que la población construye sus conocimientos en el contexto de su vida cotidiana*. En términos coloquiales, esto se refiere hasta qué punto los individuos perciben el riesgo para reconocer un

problema específico de salud, o bien, cuál es el peso relativo que se le otorga a los riesgos sobre la salud con respecto a los riesgos socioambientales; qué significa para un individuo “estar en riesgo”, y cómo son percibidos por los individuos, para evitar los daños asociados (Nichter, 2006). En este sentido, el concepto de riesgo, desde el enfoque sociocultural es más amplio que el concepto de riesgo manejado desde el punto de vista “matemático-estadístico”.

Sobre la percepción de riesgo y medioambiente, es importante visualizar este concepto a partir de la relación entre el hombre y su entorno, con enfoque en los impactos para la salud. Eso implica entender la relación que los grupos sociales mantienen con la naturaleza, en cómo la conceptualizan, manejan y cómo se definen en cuanto a ser parte de ésta. Al mismo tiempo, se necesita entender en las comunidades el concepto local de la *enfermedad* y de la *salud*, y las estrategias tanto interpretativas como prácticas que se establecen para enfrentar o prevenir la primera y preservar la segunda.

La antropología médica, disciplina enfocada en el análisis y comprensión de estos procesos, nos ofrece importantes instrumentos teóricos para acercarnos al análisis crítico del paradigma biomédico-científico (también analizado como producto de una tradición cultural específica), a cómo entender diversas modalidades en la construcción del proceso salud-enfermedad-atención, así como aquellas pertenecientes a otras tradiciones (Kleinman, 1978; Kleinman, 1980; Douglas y Wildavsky, 1982; Augé y Herzlich, 1984; Kleinman, 1988; Menéndez, 1990; Sargent & Johnson, 1996; Kasperson, 2005).

Existen estudios que han analizado también la relación entre el concepto de riesgo y las políticas públicas, para entender cómo se han diseñado e implementado los programas oficiales de prevención y/o educación (cuando existen) relacionados con temas de salud y medio ambiente. Desde luego, se ha analizado el impacto que estos programas tienen entre la población y a veces se ha demostrado que éstos no repercuten mucho en la calidad de vida o en la práctica cotidiana de la población, por el hecho de que se emplea un lenguaje demasiado técnico y/o lejano de los conceptos locales, o por no tomar en cuenta de manera suficiente el punto de vista de los beneficiarios, con respeto a sus necesidades y expectativas.

Bajo este marco, es necesario retomar el punto de vista de los distintos actores sociales con relación a la conservación ambiental y del agua, tomando en cuenta sus explicaciones, sus categorías, sus conceptualizaciones y sus diversas cosmogonías. Este análisis sistémico podría conectar (o reconectar) y reconocer el significado local de las comunidades mayas como componentes esenciales para tender hacia una subsistencia (o existencia) sostenible, respecto al “saber ecológico tradicional” o “manejo tradicional de los recursos” (Hornborg, 2001).

Por supuesto, al mismo tiempo, es necesario que el sector oficial aplique las normas y decretos establecidos como instrumentos legales en materia de conservación ambiental, derechos humanos y, también, se ajuste a la normatividad internacional, conectando enfoques e iniciativas locales de las comunidades mayas con enfoques globales para el desarrollo social, económico y ambiental, ya que hoy en día “la naturaleza o el medio ambiente, no debe analizarse desde una perspectiva local, sino visualizarse de manera sistémica, el planeta entero es una aldea global” (Descola y Pálsson, 2001), bajo un sistema débilmente integrado, con interacciones físicas, biológicas, químicas, sociales, económicas, en donde las acciones positivas o negativas que se tomen en un lugar determinado del planeta tendrán un beneficio o repercusión en otras partes de la tierra, tal como sucede actualmente bajo un alto estrés ambiental y malas decisiones y prácticas gubernamentales.

Asimismo, se deben abordar aspectos importantes sobre la legislación local y nacional sobre la conservación del medio ambiente y del agua, resolver la falta de programas de capacitación sobre agricultura sustentable, así como la resistencia de las comunidades mayas por violaciones a sus derechos humanos y la falta de aplicación del debido proceso de consulta previa e informada de las autoridades a las comunidades indígenas acerca del uso de OCP en la agricultura, altamente contaminantes para el acuífero, precisamente en zonas decretadas para la conservación. El Estado viola así su propia legislación ambiental existente.

Se trata de un tema fundamental para la conservación ambiental y la preservación de la salud humana, que tiene que ver con la elaboración oficial de programas de sensibilización-comunicación que incluya información adecuada, inexistentes a la fecha, con políticas públicas que tomen en cuenta las exigencias y el punto de vista de los distintos actores sociales, buscando metodologías para la participación comunitaria. Por eso, es necesario no solamente replantear el vínculo entre naturaleza y sociedad, sino también reconsiderar la relación –muchas veces vertical y no igualitaria– entre los actores sociales y las políticas públicas actuales, pero en marcos horizontales.

Con base en lo anterior, las poblaciones mayas, en gran medida, tienen una percepción generalizada de que los agroquímicos o “líquidos” como ellos les llaman, no afectan al medio ambiente (suelos, aire, agua) ni a su propia salud ni la de sus familias. Esta percepción generalizada de los pueblos mayas de que los agroquímicos no causan daño (o un mínimo daño) a su entorno natural es debido también a que los gobiernos han mantenido en altos índices de pobreza y marginación a estas comunidades, con muy bajos niveles educativos, falta de empleo y una alta dependencia de estas comunidades hacia el gobierno (Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015). Entonces se visualiza una alta dependencia

inducida de necesidad para la subsistencia de estos grupos marginados en los países en desarrollo, pero a un elevado costo e incluso la muerte por exposición crónica.

Actualmente, existen iniciativas para una agricultura sostenible, basada en fundamentos agroecológicos; algunas comunidades mayas trabajan estos aspectos acompañadas de organizaciones sociales, religiosas, académicas. Por supuesto, por nuestra parte, se contribuye publicando resultados, impartiendo pláticas y exponiendo los estudios realizados sobre niveles de contaminación en el agua, la bioacumulación de plaguicidas en sangre y en leche materna en mujeres mayas. Esta transmisión de resultados de investigación a las comunidades locales les impacta e interesa, al saber las consecuencias para su salud, la de sus tierras y la de sus familias sobre el uso de estos plaguicidas cancerígenos.

El uso de OCP en Yucatán y sus implicaciones

La Asamblea General de Naciones Unidas, en la resolución 64/292, explícitamente reconoció el derecho humano al agua y saneamiento, reafirmando que éstos son esenciales para la realización de todo derecho humano (UN, 2010). Esta resolución es crítica, desde que el estado de Yucatán se encuentra en el último lugar a nivel nacional en términos de saneamiento e infraestructura hídrica (CONAGUA, 2015).

En Yucatán, existen diversas violaciones a la legislación ambiental nacional e internacional, así como a los derechos humanos, por la distribución y uso de plaguicidas nocivos que perjudican la salud y bienestar de los pueblos indígenas mayas.

Además, se violan acuerdos y tratados internacionales, ya que estos plaguicidas están prohibidos y/o restringidos a nivel internacional por diversos organismos como el Convenio de Estocolmo (2008) (**Tabla 4**), el Acuerdo de Rotterdam (2010) (**Tabla 5**), la Declaración de Praga, entre otros.

Tabla 4. Regulación de pesticidas en el Convenio de Estocolmo.

Pesticida	Condición
Aldrín	Eliminación
Dieldrin	Eliminación
Endrín	Eliminación
Heptacloro	Eliminación
Lindano	Eliminación
Endosulfán	Eliminación
Hexaclorobenceno	Eliminación
DDT	Restringido

El Convenio de Rotterdam introduce el Procedimiento de Consentimiento Fundamentado Previo (CFP), en donde los países (México, incluido) cuentan con la información que necesitan sobre los productos químicos peligrosos para evaluar los riesgos y tomar decisiones sobre las importaciones informadas de productos químicos y que están sujetos al comercio internacional (Convenio de Rotterdam, 2010). Asimismo, la clasificación de la toxicidad de OCP de acuerdo con la Agencia Internacional de Investigaciones sobre el Cáncer (IARC, 2017), puede verse en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Pesticidas organoclorados incluidos en la Convención de Rotterdam y su carcinogenicidad. Fuentes: WHO, 2009; Rotterdam Convention, 2010; IARC, 2017.

Pesticida	CAS	Categoría	Clasificación según carcinogénesis
Aldrín	309-00-2	Pesticida	2A Probable carcinogénico en humanos (IARC, 2017)
Dieldrín	60-57-1	Pesticida	2A Probable carcinogénico en humanos (IARC, 2017)
DDT	50-29-3	Pesticida	2A Probable carcinogénico en humanos (IARC, 2017)
Endosulfán	115-29-7	Pesticida	2A Probable carcinogénico en humanos (WHO, 2009)
Heptacloro	76-44-8	Pesticida	2B Posible carcinogénico en humanos (IARC, 2017)
Lindano	58-89-9	Pesticida	1 Carcinogénico en humanos (IARC, 2017)

En materia de derechos humanos y sobre el derecho al acceso al agua para consumo humano segura para beber, también se violan facultades plasmadas en la legislación nacional e internacional.

Consideraciones sobre la legislación ambiental

El riesgo de afectaciones al agua superficial y al agua subterránea compromete la sustentabilidad de los ecosistemas que soportan los servicios ambientales necesarios para la producción de los demás servicios; es por ello que, en octubre de 2013, se publicó en el Diario Oficial del Gobierno del Estado de Yucatán, el Decreto 117, que establece el Área Natural Protegida denominada *Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes*. Algunas consideraciones relacionadas con el decreto son:

- El derecho humano de toda persona de gozar de un ambiente ecológicamente equilibrado y la protección de los ecosistemas que conforman el patrimonio natural de Yucatán.
- Las personas en el estado tienen derecho a vivir en un ambiente saludable; a hacer uso racional de los recursos naturales; a negarse a realizar actividades que causen deterioro al ambiente; a tener acceso a la información actualizada acerca del estado del ambiente y a participar en las actividades destinadas a su conservación y mejoramiento.

- México es signatario del Convenio sobre Diversidad Biológica (CDB) de la ONU, estableciendo que los pueblos indígenas y las comunidades locales son sujetos sociales centrales para la conservación y el desarrollo sustentable, por lo que es fundamental fomentar la conservación *in situ* de la biodiversidad y agro diversidad utilizada por la población maya y rural, de manera que los servicios de los ecosistemas garanticen la permanencia y enriquecimiento del patrimonio biocultural del cual son custodios y de los que depende el bienestar humano.

-México es también signatario del Convenio sobre Humedales de Importancia Internacional conocido como Convenio de Ramsar, (el Anillo de Cenotes" fue decretado Sitio Ramsar internacional para la conservación en 2011). Se adquirió el compromiso de fortalecer las acciones de conservación de sitios relevantes de humedales y cuerpos de agua continentales por sus características y ecosistemas únicos que albergan alta biodiversidad y endemismo, así como las formas culturales de apropiación y uso de los mismos.

-Que la constitución geológica del acuífero que consta de calizas fracturadas, con conductos y oquedades de disolución, muy poroso y permeable, determina una alta vulnerabilidad del acuífero a la contaminación que proviene de las aguas residuales domésticas, municipales, agropecuarias e industriales, las cuales carecen de un eficiente sistema de tratamiento para su disposición y, por ende, los contaminantes penetran fácilmente y en forma casi inmediata al manto freático, sin permitir que se lleven a cabo procesos de atenuación como reacciones fisicoquímicas, antes de su ingreso al acuífero.

La Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes se ubica en los Municipios de Seyé, Acanceh, Timucuy, Homún, Cuzamá, Tecoh, Tekit, Tahmek, Hochtún, Xocchel, Hocabá, Sanahcat y Huhí del estado de Yucatán, todos correspondientes a la zona de recarga del Anillo.

Reflexiones finales

El escenario natural de suelos kársticos y vulnerabilidad extrema a la contaminación del acuífero, los aspectos sociales de altos niveles de pobreza, bajos niveles educativos que involucra una reducida percepción de riesgo de las comunidades en el uso y manejo de agroquímicos tóxicos, la falta de apoyo oficial en programas de capacitación para una agricultura sostenible en la zona rural, la falta de consulta previa e informada a las comunidades mayas en el uso de agroquímicos tóxicos, el penoso último lugar del estado de Yucatán a nivel nacional en infraestructura para el saneamiento hídrico, así como las diversas violaciones a la legislación ambiental, en su conjunto, dan como resultado que el estado de Yucatán tenga altos niveles

de plaguicidas cancerígenos, metales, materia orgánica en el agua de cenotes y en el acuífero, altos impactos en la salud pública por los elevados niveles de bioacumulación en sangre y leche materna en el ser humano, riesgos potenciales a diversos cánceres, así como altos impactos en el medio ambiente.

El respeto hacia los derechos humanos y ambientales deberá permear en el sector oficial, para que tenga lugar un nuevo diseño de políticas públicas sustentables, la aplicación de las normas oficiales y la legislación ambiental, estableciendo un marco de desarrollo humano sostenible.



Cenote Kampepén, ubicado cerca del poblado de Chinquilá, Yucatán. Es un cenote somero, pero con formaciones impresionantes de estalactitas que varían en cuanto a formas y tamaños. Buzo: Raúl Acosta. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.



Capítulo 14

El agua subterránea y los procesos de contaminación: revisión normativa federal y del estado de Yucatán

María del Carmen A. Carmona-Lara¹

Alexis Cervantes-Pichardo²

¹Instituto de Investigaciones Jurídicas de la UNAM

²Licenciatura en Manejo Sustentable de Zonas Costeras de la UNAM



Introducción

El agua es un elemento fundamental para el desarrollo de la vida en todas sus esferas. Particularmente, las aguas subterráneas constituyen el 95% del agua dulce contenida en nuestro país y abastecen al 75% de las ciudades; además, en lugares como el estado de Yucatán, representa la única fuente de agua dulce para la población (Graniel-Castro, 2010; Cubas *et al.*, 2017).

Pese a su importancia, la legislación mexicana, tanto a nivel federal como estatal, en el caso de Yucatán, aún no ha sentado las bases necesarias para la regulación de la contaminación de este recurso. El presente capítulo tiene como objetivo brindar al lector una aproximación a la gestión del agua subterránea ante los procesos de contaminación desde la perspectiva jurídica federal y de la legislación local yucateca.

El agua y su relación con los derechos humanos

El agua juega un papel fundamental en los ecosistemas, en las actividades productivas y en la vida del hombre. Resulta casi imposible pensar en algún proceso humano que directa o indirectamente no se encuentre vinculado a este recurso. Su importancia llevó a que en el año 2002, el Comité de Derechos Económicos, Sociales y Culturales de la Organización de las Naciones Unidas haya reconocido en la Observación número 15 que el derecho humano al agua es indispensable para una vida humana y digna. Este derecho es definido como el derecho de cada uno a disponer de agua suficiente, salubre, saludable, aceptable, físicamente accesible y asequible para su consumo (CDESC, 2003).

Además en el 2010, surge la Resolución 64/292, en donde la Asamblea General de las Naciones Unidas reconoce de manera explícita el derecho humano al agua y al saneamiento. Esta resolución insta a los estados y organizaciones internacionales a destinar recursos financieros, y a propiciar la capacitación y transferencia de tecnología a los países en vías de desarrollo para suministrar agua potable y contar con un saneamiento saludable, limpio, accesible y asequible para todos.

No es sino hasta dos años después, en el que este derecho queda plasmado en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM), ya que el 8 de febrero de 2012 se publica en el Diario Oficial de la Federación una reforma al párrafo sexto del Artículo 4° constitucional, en donde se establece que:

Toda persona tiene derecho al acceso, disposición y saneamiento de agua para consumo personal y doméstico en forma suficiente, salubre, aceptable y asequible. El Estado garantizará este derecho y la ley definirá las bases, apoyos y modalidades para el acceso y uso equitativo y sustentable de los recursos hídricos, estableciendo la participación de

la Federación, las entidades federativas y los municipios, así como la participación de la ciudadanía para la consecución de dichos fines (CPEUM, Art. 4).

Dado que este capítulo está centrado en la calidad del agua, es necesario ahondar en el significado de agua salubre. La Organización de las Naciones Unidas menciona que el concepto de "saludable" (que es utilizado como "salubre" en la CPEUM) hace referencia a que el agua para el uso doméstico y público debe estar libre de microorganismos, sustancias químicas y peligros radiológicos que puedan poner en riesgo la salud humana (ONU, 2014).

La relevancia de que nuestra Carta Magna reconozca el derecho humano al agua y al saneamiento resulta fundamental, ya que no se trata de un derecho aislado, sino que por el carácter estratégico del agua, también se vincula con el derecho de protección a la salud, el derecho a un medio ambiente sano, el derecho a disfrutar de una vivienda digna y decorosa, y el derecho a la alimentación nutritiva, suficiente y de calidad; consagrados también en el Artículo 4° de la CPEUM.

¿Qué son y de quiénes son las aguas subterráneas? Respuestas desde el punto de vista jurídico

La Ley de Aguas Nacionales (LAN) en su Artículo 3° define a los acuíferos como:

Cualquier formación geológica o conjunto de formaciones geológicas hidráulicamente conectadas entre sí, por las que circulan o se almacenan aguas del subsuelo que pueden ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento y cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales del subsuelo.

Además, en este mismo Artículo, establece que se entienden como aguas del subsuelo: "Aquellas aguas nacionales existentes debajo de la superficie terrestre".

Pese a que en la LAN se reconozcan a las aguas del subsuelo como nacionales, la propiedad de las aguas subterráneas ha tenido un tinte bastante difuso, ya que en el párrafo quinto del Artículo 27 de la CPEUM se establece que:

Son propiedad de la Nación las aguas de los mares territoriales en la extensión y términos que fije el Derecho Internacional; las aguas marinas interiores; las de las lagunas y esteros que se comuniquen permanente o intermitentemente con el mar; las de los lagos interiores de formación natural que estén ligados directamente a corrientes constantes; las de los ríos y sus afluentes directos o indirectos, desde el punto del cauce en que se inicien las primeras aguas permanentes, intermitentes o torrenciales, hasta su desembocadura en el mar, lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional; las de las corrientes constantes o intermitentes y

sus afluentes directos o indirectos, cuando el cauce de aquéllas en toda su extensión o en parte de ellas, sirva de límite al territorio nacional o a dos entidades federativas, o cuando pase de una entidad federativa a otra o cruce la línea divisoria de la República; la de los lagos, lagunas o esteros cuyos vasos, zonas o riberas, estén cruzadas por líneas divisorias de dos o más entidades o entre la República y un país vecino, o cuando el límite de las riberas sirva de lindero entre dos entidades federativas o a la República con un país vecino; las de los manantiales que broten en las playas, zonas marítimas, cauces, vasos o riberas de los lagos, lagunas o esteros de propiedad nacional, y las que se extraigan de las minas; y los cauces, lechos o riberas de los lagos y corrientes interiores en la extensión que fija la ley. Las aguas del subsuelo pueden ser libremente alumbradas mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público o se afecten otros aprovechamientos, el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización y aún establecer zonas vedadas, al igual que para las demás aguas de propiedad nacional. Cualesquiera otras aguas no incluidas en la enumeración anterior, se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos por los que corran o en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estas aguas se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicten las entidades federativas (CPEUM, Art. 27).

En este contexto, la ley considera a las aguas del subsuelo como propiedad de la Nación, pese a que constitucionalmente no son reconocidas explícitamente como tal. Esto se debe a que en este párrafo se hace un listado limitativo de aquellas aguas que le pertenecen a la Nación, y dentro de las cuales las del subsuelo no figuran como una de ellas, incluso menciona que pueden ser libremente alumbradas y apropiadas por el dueño del terreno.

Aunado a lo anterior, el Artículo 838 del Código Civil Federal dicta que:

No pertenecen al dueño del predio los minerales o sustancias mencionadas en el párrafo cuarto del artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, ni las aguas que el párrafo quinto del mismo artículo dispone que sean de propiedad de la Nación.

Ante este problema, una asunción cercana para esta incógnita es que las aguas del subsuelo constituyen parte de la propiedad privada. Esto se debe a que al momento de hacer esta disposición aún no se tenía un conocimiento científico sobre este recurso y su aprovechamiento no era tan significativo como lo es hoy en día y, por ello, no fueron reconocidas explícitamente como bienes de la Nación. Además, en ese entonces las aguas subterráneas eran consideradas como un bien accesorio al predio bajo el principio de derecho de accesión, en donde el dueño no solamente era el propietario del terreno, sino de lo que se encontraba por arriba y por debajo de él (Carrillo-Rivera y Domínguez, 2007; Wolfe, 2014; Carmona-Lara, 2017).

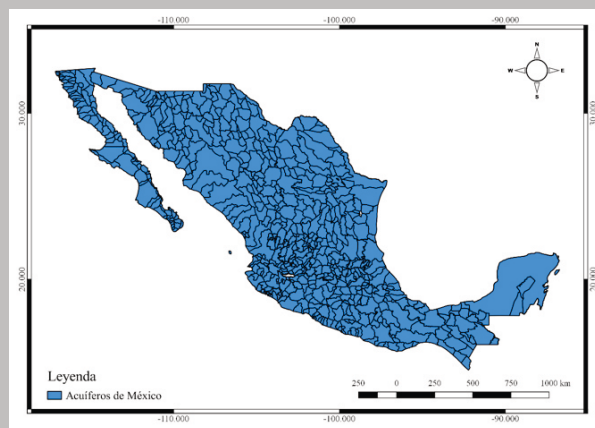
Sin embargo, resulta erróneo aterrizar esta concepción del agua subterránea a la realidad porque no responde a su verdadero funcionamiento ni naturaleza. Los avances en la hidrogeología moderna –acontecidos en la segunda mitad del siglo XX, principalmente por J. Tóth– nos han permitido saber que el agua del subsuelo no es estática, sino que tiene un flujo vertical y que a su vez transita de manera horizontal a través de flujos locales, intermedios y regionales. Además se sabe que las aguas subterráneas no permanecen en el subsuelo, sino que éstas llegan a aflorar en ecosistemas terrestres, costeros y marinos y cuyo vínculo resulta fundamental para mantener su integridad (Carrillo-Rivera y Domínguez, 2007; Carmona-Lara *et al.*, 2017).

En este sentido, México continúa operando bajo un esquema que no concuerda con la hidrogeología moderna y que además no ha mostrado el interés para integrar a los flujos del agua subterránea como el elemento principal para la gestión del agua del subsuelo.

Cubas y colaboradores (2017) establecen que las actuales concepciones de los acuíferos en las leyes y reglamentos del país resulta limitado, ya que no considera la comunicación lateral subterránea entre cuencas o subcuencas vecinas, propiciando condiciones en donde, desde una perspectiva regional, la dinámica ambiental del agua subterránea no sea comprensible.

Y es que en la actualidad, los acuíferos de nuestro país (**Figura 1**) son delimitados bajo los criterios establecidos por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), dentro de los cuales la información para determinar los tipos y direcciones de flujo subterráneo no figuran, e incluso, emplean un criterio geopolítico en donde llegan a coincidir –en los casos que se permita– el límite estatal o municipal con el del acuífero, con la finalidad de facilitar el trabajo administrativo para la asignación de concesiones en el área correspondiente, pese a que no sea un criterio técnico científico y limite el verdadero contexto del funcionamiento del agua subterránea (CONAGUA, 2009).

Figura 1. Actual delimitación de los acuíferos bajo los criterios de la CONAGUA.
Fuente: Elaboración propia con datos de la CONAGUA, 2014.



Incluso cabe mencionar que el Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la Región Hidrológico-Administrativa XII península de Yucatán contempla en la fase de descripción a los sistemas de flujos del agua subterránea, y que además no figuran en los objetivos del programa; posteriormente, utilizan un mapa con los acuíferos delimitados por la CONAGUA bajo sus propios criterios (mencionados en el párrafo anterior). Si se analizan a detalle estas dos imágenes (**Figura 2**) se puede observar que los flujos del agua subterránea sobrepasan los límites del acuífero, entrando así ante una lógica sin sentido de cómo son demarcados actualmente.

Esto cobra relevancia porque, como ya se ha mencionado, el agua del subsuelo nunca permanece por debajo de la tierra, sino que ésta descarga en ecosistemas terrestres, marinos y costeros. Especialmente en Yucatán se ha documentado la existencia de manantiales en las selvas, lagunas, manglares, petenes y en el medio marino; implicando que existe una estrecha relación entre el continente y el mar (Herrera-Silveira *et al.*, 1988; Perry *et al.*, 2003).

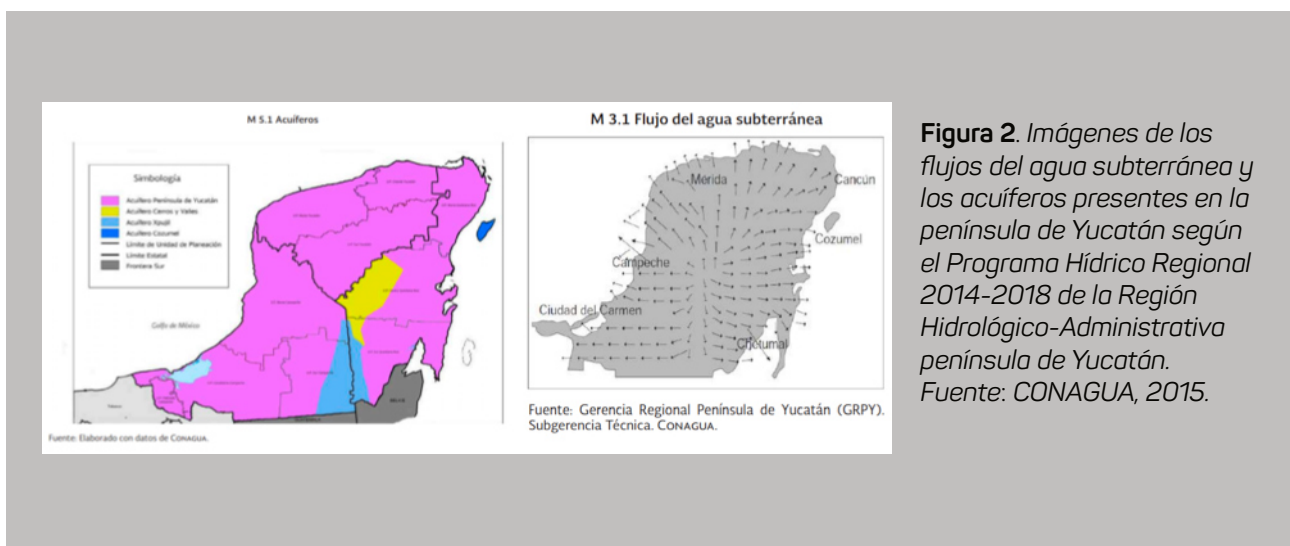


Figura 2. Imágenes de los flujos del agua subterránea y los acuíferos presentes en la península de Yucatán según el Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la Región Hidrológico-Administrativa península de Yucatán. Fuente: CONAGUA, 2015.

Afortunadamente, en Yucatán los estudios hidrogeológicos han tomado una gran relevancia en los últimos años. En un estudio de Bauer-Gottwein y colaboradores (2011), los autores presentan un modelo modificado de los flujos del agua subterránea de un estudio anterior que desarrolló Charvet (**Figura 3**). Sin embargo, aún queda pendiente cartografiar los flujos de agua locales, intermedios y regionales, y que éstos logren permear a los tomadores de decisiones para ser incluidos en la legislación y en las políticas públicas.

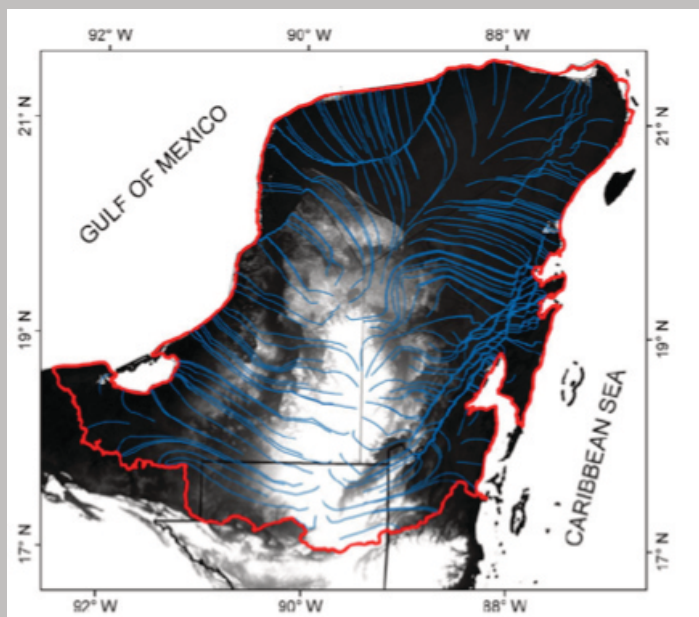


Figura 3. *Flujos del agua subterránea en la península de Yucatán.*
Fuente: Bauer-Gottwein et al., 2011).

A raíz de lo planteado anteriormente, se puede decir que este desconocimiento de los flujos subterráneos por parte de nuestro sistema legal nos conduce a un estado de indefinición sobre la propiedad de las aguas del subsuelo, al no ser reconocidas en el texto constitucional como un bien de la Nación, para lo que Carmona-Lara (2017) menciona que este hecho ha propiciado que hayan surgido amparos que duraron entre 30 y 40 años, en donde las empresas privadas se aprovechaban de esta indefinición para no pagar por el uso de la extracción del agua subterránea por el simple hecho de provenir de sus pozos.

La contaminación del agua subterránea

En el año 2006, se publica en el Semanario Judicial de la Federación y su Gaceta que:

Aguas del subsuelo. Es competencia Federal regular su explotación, uso, o aprovechamiento, incluyendo su extracción o descarga. Los artículos 27, quinto y sexto párrafos y 73, fracciones XVII y XXIX, inciso 2o., de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, establecen cuáles son las aguas propiedad de la Nación; que las aguas del subsuelo podrán alumbrarse libremente mediante obras artificiales y apropiarse por el dueño del terreno, pero cuando lo exija el interés público el Ejecutivo Federal podrá reglamentar su extracción y utilización, así como establecer zonas vedadas; que el dominio de la Nación sobre las aguas es inalienable e imprescriptible y que su explotación, uso o aprovechamiento por parte de particulares o por sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas, requerirá de concesión otorgada por el Ejecutivo Federal; asimismo, que corresponde al

Congreso de la Unión expedir leyes sobre el uso y aprovechamiento de las aguas de jurisdicción federal y establecer contribuciones sobre el aprovechamiento y explotación de ese recurso natural. Por su parte, dicho Congreso, en ejercicio de sus facultades, expidió la Ley de Aguas Nacionales para regular dichos uso y aprovechamiento, cuyos artículos 3o., 4o., y 91 determinan cuáles son las aguas residuales; que su administración corresponde al Ejecutivo Federal, quien la ejercerá directamente o a través de la Comisión Nacional del Agua, y que su recarga o infiltración para recargar acuíferos requiere permiso de la Comisión y ajustarse a las Normas Oficiales Mexicanas que al efecto se emitan. Atento a lo anterior, se concluye que es competencia federal regular la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas del subsuelo, incluyendo su extracción y descarga o infiltración de aguas residuales para recargar acuíferos (Tesis P./J. 40/2006).

De manera sucinta, esta tesis jurisprudencial fundamenta que el dominio imprescriptible e inalienable de la Nación sobre las aguas y la capacidad del Ejecutivo Federal para imponer reglamentos y vedas en las aguas subterráneas cuando lo dicte el interés público, así como el hecho de que los particulares requieren de concesiones para explotarla facultan a la Federación para poder regular y gestionar las aguas del subsuelo.

Por otro lado, la Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establece que la responsabilidad de preservar y aprovechar el agua de manera sustentable junto con la protección de los ecosistemas acuáticos le corresponde al Estado y a los usuarios del agua, y que la Secretaría del Medio Ambiente realizará todas las acciones necesarias para controlar o evitar procesos de contaminación en las aguas nacionales (LGEEPA, art. 88).

En México, la CONAGUA es el medio por el cual el poder Ejecutivo Federal administra y ejerce como autoridad para la gestión de los recursos hídricos. Entre sus múltiples funciones, se encarga de publicar información sobre la calidad del agua a través del Sistema de Información Nacional del Agua (SINA), en donde cada Organismo de Cuenca y sus órganos auxiliares (*i.e.*, Comités Técnicos de Aguas Subterráneas) se encargan de monitorear la calidad de las cuencas y acuíferos de sus regiones hidrológico-administrativas.

Para este fin se emplean como indicadores la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5), la demanda química de oxígeno (DQO), coliformes fecales y sólidos disueltos totales (SDT) para cada región hidrológico-administrativa. Por otro lado, el SINA tiene un apartado para los acuíferos del país, que en lo que respecta a la calidad del agua, únicamente menciona si existe intrusión y salinización en el acuífero.

Esto implica que la CONAGUA pone a nuestra disposición información referida a la calidad de las aguas del subsuelo, pero que ésta nos brinda una imagen parcial y empobrecida de las condiciones reales de nuestros acuíferos y su estado relacionado con temas de

contaminación, ya que se omiten indicadores de otros agentes químicos que pueden comprometer el bienestar de los ecosistemas o de la misma salud humana.

Este hecho nos conduce a otra disyuntiva: aunque contemos con Normas Oficiales Mexicanas (NOM) que regulen la contaminación del agua subterránea, que establezcan las disposiciones a las que deben sujetarse las obras que incidan en la calidad de este recurso y sobre los límites permisibles de contaminantes en el agua potable (**Cuadro 1**), aún no contamos con una que nos permita normar los límites máximos permisibles de los contaminantes microbiológicos, de agentes químicos y radiológicos en los acuíferos. Esto resulta relevante debido a que las NOMs que existen tienen un objetivo y campo de aplicación que no necesariamente son compatibles para determinar la contaminación de las aguas del subsuelo.

Cuadro 1. Normas Oficiales Mexicanas relacionadas con la calidad del agua subterránea.

Norma Oficial Mexicana	Nombre	Breve descripción del objetivo y campo de aplicación
NOM-014-CONAGUA-2003	Requisitos para la recarga artificial de acuíferos con agua residual tratada.	Obras nuevas y existentes planeadas de recarga artificial que descarguen aguas tratadas y que incrementen el volumen de agua en los acuíferos.
NOM-127-SSA1-1994	Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.	Establece los límites máximos permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización del agua para uso y consumo humano. Aplica para los sistemas de abastecimiento privados y públicos y personas físicas o morales que la distribuyan.

Para ejemplificar esta idea, imaginemos entonces que un investigador opte por determinar el grado de contaminación por metales pesados en un acuífero: para efectos legales, la NOM-014-CONAGUA-2003 le resultaría inútil si en ese acuífero no existieran sistemas de recarga artificial de acuíferos. Probablemente, la NOM-127-SSA1-1994 podría funcionar al contemplar los límites máximos permisibles de calidad para uso y consumo humano, empero, su aplicación queda limitada a este escenario porque su objetivo y campo de aplicación es acotado a los sistemas de abastecimiento públicos y privados o a cualquier persona física o moral que la distribuya en el territorio nacional.

Claro está que no todos los acuíferos presentan las mismas condiciones ambientales y geológicas, mucho menos se encuentran vinculados a un único contexto sociocultural ni económico. Y es más, como ya se ha mencionado antes, éstos se rigen por los sistemas de flujo que los caracterizan, que para el caso de la contaminación toman relevancia porque nos permiten saber la dirección de los contaminantes y los sitios a los que podrían llegar a través de las descargas superficiales o

marinas. Es por esto que resultaría necesario que cada acuífero, con los sistemas de flujo bien delimitados, contara con una norma de carácter obligatorio construida a través de una perspectiva sistémica.

Yucatán y el agua subterránea

En lo que respecta al agua, Yucatán resulta ser un estado sumamente privilegiado, ya que en el estado precipitan alrededor de 1058.3 mm anualmente (INEGI, 2002). Además, las condiciones de karsticidad han configurado un terreno carente de escurrimientos superficiales en donde domina una red de conductos y cavernas subterráneas por las que el agua transita, aunado a una serie de elementos producto de la disolución de las rocas como las dolinas (o cenotes, nombre que reciben localmente) y que forman parte de la identidad del estado (Graniel-Castro, 2014).

Sin embargo, sus mismos atributos hidrogeológicos le han conferido al estado una elevada vulnerabilidad ante los problemas de contaminación del agua, dada la rápida infiltración de los contaminantes en el suelo y a su movilización dentro del acuífero. Diversos estudios documentan la presencia de metales pesados, materia fecal, nitratos y agroquímicos en el agua subterránea del estado (Pacheco-Ávila y Cabrera-Sansores, 2003; Escolero *et al.*, 2005; Árcega-Cabrera *et al.*, 2014; Polanco-Rodríguez *et al.*, 2015; Árcega-Cabrera *et al.*, 2018).

En el capítulo II de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán (LPMAEY) se dictan las disposiciones para la protección de los ecosistemas existentes en los cenotes, cuevas y grutas. En esta ley se le reconoce a la Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente (SEDUMA) la facultad para procurar la protección, conservación y restauración de los ecosistemas que se encuentren en estas configuraciones kársticas, para prevenir su contaminación y favorecer un aprovechamiento sustentable y racional, a excepción de los recursos que se encuentren bajo la tutela de la autoridad Federal.

Si bien resulta un acierto que esta ley contenga este apartado, el Artículo 109 de la LPAMEY responsabiliza al Poder Ejecutivo de la entidad, por conducto de la autoridad competente, de conocer y aplicar la política hídrica de acuerdo con las leyes nacionales y demás disposiciones aplicables. Lo cual para el caso de la gestión del agua en Yucatán aún es un tema por resolver.

En principio, esto se debe a que en términos de política hídrica, según la LAN en la fracción I del Artículo 14 BIS 6, reconoce que la planificación hídrica incluye un componente local, estatal, por cuenca hidrológica, región hidrológica administrativa y nacional. Además, y a *grosso modo*, la LAN dicta que la planificación hídrica es de carácter obligatorio para la gestión integrada de los recursos hídricos, ecosistemas y otros recursos

naturales, y que en esta perfilan los programas hídricos a nivel estatal o a nivel acuífero, entre otros más.

Lo cierto es que la legislación yucateca aún no cuenta con una ley de aguas en donde se formule un esquema de responsabilidades, derechos, principios y criterios para la programación en materia de recursos hídricos a nivel estatal, implicando que la política hídrica referida en el Artículo 109 de la LPMAEY sea el Programa Hídrico Nacional y el Programa Hídrico Regional de la Región Hidrológico-Administrativa XII península de Yucatán (PHR XII PY).

Sin duda alguna, contar con un programa regional resulta útil porque nos da la posibilidad de definir acciones dentro de un territorio que cuente con condiciones similares. Sin embargo, resulta necesario que a nivel estatal surjan programas en materia hídrica para atender de manera particular a las necesidades sociales y económicas de una entidad federativa.

Las aguas residuales

La LAN define a las aguas residuales en la fracción VI del Artículo 3 como:

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos público urbano, doméstico, industrial, comercial, de servicios, agrícola, pecuario, de las plantas de tratamiento y, en general, de cualquier uso, así como la mezcla de ellas (LAN, Art. 3).

Si se analiza nuevamente el párrafo quinto del Artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, entonces se concluye que las aguas residuales tampoco figuran como bienes de la Nación. Sin embargo, determinar al propietario resulta más fácil aún, puesto que esta disposición y el Artículo 838 del Código Civil Federal determinan de manera indirecta que, en este caso, resultan ser de los particulares, reiterado por el Artículo 16 de la LAN que dicta que éstas se vuelven bienes de la Nación cuando descargan a cuerpos receptores de propiedad Nacional.

Las condiciones geológicas del estado de Yucatán no favorecen la posibilidad de contar con un sistema de drenaje dado el costo de construcción. Por lo cual, en el Reglamento de la LPAMEY (RLPAMEY) se dicta que las descargas de aguas residuales domésticas deben ser vertidas en fosas sépticas u otro sistema que garantice su tratamiento, que una vez tratadas deben ser vertidas en campos de irrigación y absorción y que los ayuntamientos tienen la obligación de reglamentar su construcción, con el fin de abatir los problemas de contaminación (RLPAMEY, Art. 195; RLPAMEY, Art. 196; RLPAMEY, Art. 199).

Batllore-Sampedro (2016) cita un estudio levantado por DAICOS, SA de CV, en donde se determina que el 40% de un total de viviendas registradas disponen sus aguas residuales en fosas sépticas. Sin

embargo, de este porcentaje, el 60% de las viviendas nunca ha efectuado un trabajo de limpieza o mantenimiento de las fosas sépticas. Además, datos de la CONAGUA aseveran que, en el 2015, Yucatán disponía de 26 plantas de tratamiento con una capacidad instalada de 416 l s^{-1} y con un caudal tratado de 184 l s^{-1} , empero la cobertura de tratamiento era del 4.5%. Además el estado no cuenta con plantas potabilizadoras y, junto con San Luis Potosí y Chiapas, es uno de los estados con las coberturas de desinfección más bajas del país, que para el estado de Yucatán se tiene un porcentaje del 87.5% (CONAGUA, 2016).

Otro problema está relacionado con la premisa de que el aumento de la demanda de producción de alimentos, por parte de la zona turística de Quintana Roo y de mercados extranjeros, ha incrementado las actividades agrícolas en Yucatán, mismas que se han vuelto sumamente dependientes de un control químico. Además, las actividades ganaderas también han cobrado relevancia en el estado de Yucatán (Eastmond y García de Fuentes, 2010). Estas actividades suponen un riesgo para el estado por el uso de agroquímicos, medicamentos, nutrientes y microorganismos patógenos derivados de las heces del ganado que se infiltran directamente al acuífero y cuyo impacto se ha detectado ya en la zona costera (Árcega-Cabrera *et al.*, 2014; Kantún *et al.*, 2018a; Kantún *et al.*, 2018b).

El derecho humano al agua: ¿quién lo asegura?

Como se establece en el Artículo 4° de la CPEUM, le corresponde al Estado garantizar el derecho humano al agua, además consagra que “la ley será la que defina los sustentos para el acceso y uso equitativo de estos recursos estableciendo la participación de la Federación, entidades federativas, municipios y la ciudadanía”.

A lo largo de este capítulo se han sentado ya algunas bases sobre la gestión del agua subterránea, tanto a nivel federal, como local. No obstante, vale la pena hacer algunas otras consideraciones y retomar conceptos ya establecidos.

El Artículo 25 de la CPEUM establece que:

Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, que fortalezca la Soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante la competitividad, el fomento del crecimiento económico y el empleo y una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales, cuya seguridad protege esta Constitución.

Por otro lado, se retoma el hecho de que la propiedad de las aguas y tierras le corresponde y ha correspondido originariamente a la Nación la cual puede transmitir sus derechos a particulares, constituyendo así

la propiedad privada, según el Artículo 27. Además en el sexto párrafo del mismo artículo se dicta que:

En los casos a que se refieren los dos párrafos anteriores, el dominio de la Nación es inalienable e imprescriptible y la explotación, el uso o el aprovechamiento de los recursos de que se trata, por los particulares o por sociedades constituidas conforme a las leyes mexicanas, no podrá realizarse sino mediante concesiones, otorgadas por el Ejecutivo Federal, de acuerdo con las reglas y condiciones que establezcan las leyes, salvo en radiodifusión y telecomunicaciones, que serán otorgadas por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (CPEUM, Art. 27).

El Artículo 115 de la CPEUM consagra que entre los servicios que deben prestar los municipios se encuentran los de suministro de agua potable, drenaje, alcantarillado, tratamiento y disposición de sus aguas residuales. Además, la Ley General de Equilibrio Ecológico y Medio Ambiente le atribuye la competencia de la aplicación de disposiciones jurídicas en materia de prevención y control de la contaminación de las aguas que se descarguen en los sistemas de alcantarillado y drenaje, así como de las aguas nacionales que se les hayan asignado.

Pese a estas disposiciones constitucionales resulta pertinente preguntar: ¿cómo asegura la Nación que se garantice el derecho humano al agua?

Como ya se ha tratado, uno de los principios del derecho humano al agua y al saneamiento es que ésta debe ser salubre. Y que pese a este principio, las estadísticas relacionadas con la potabilización, desinfección y tratamiento del agua en el estado de Yucatán resultan alarmantes y nos conducen a un serio problema para los habitantes del estado.

Así también, la CONAGUA, con la participación de los Organismos de Cuenca, proporciona información incompleta sobre la calidad del agua subterránea, omitiendo datos de otros contaminantes nocivos para la salud y la integridad de los ecosistemas. Además, dicha información se encuentra disponible vía internet y en español, lo cual menoscaba la posibilidad de las comunidades en condiciones de marginación o que no hablan español la capacidad de acceder de manera oportuna a la información, que para el caso de Yucatán ocurre que el 7.41 % de las personas mayores de 15 años son analfabetas.

Aunado a esto, debe resaltarse que cada Organismo de Cuenca se apoya en un Consejo de Cuenca de carácter consultivo, característica importante porque esto implica que la presencia y las acciones del Consejo de Cuenca no son jurídicamente vinculantes, para integrar a los usuarios del agua y uno de sus fines es acordar la política hídrica regional y dar a conocer el estado de la calidad del agua de los acuíferos. Con la escasa información brindada por la CONAGUA, los Consejos de Cuenca tienen que apoyarse en la información que se genera en el ámbito académico.

Esto implica *per se* que nuestro sistema no tiene instituciones que aseguren el derecho humano al agua. Incluso, la CNDH no podría fungir como tal debido a que ésta sólo formula recomendaciones públicas no vinculatorias ante las autoridades respectivas. A nivel estatal, ni la SEDUMA ni la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán –órgano descentralizado que se encarga de administrar, operar, ampliar y construir los sistemas de agua potable y alcantarillado en la entidad– tienen los mecanismos para garantizar este derecho.

Bajo estas condiciones de contaminación y las deficiencias en el saneamiento del agua en Yucatán, la garantía del derecho humano al agua de manera salubre termina siendo un tema pendiente por resolver.

Reflexiones finales

Pese a su relevancia, la gestión del agua subterránea en México y, por ende, en el estado de Yucatán aún no logra materializarse en nuestro sistema legal. Resulta indispensable que las aguas del subsuelo sean reconocidas explícitamente en la Constitución como parte de las aguas que son propiedad de la Nación y que su gestión se sustente sobre una perspectiva de derechos humanos, del funcionamiento de los sistemas de flujo y sus imbricaciones con los ecosistemas a los que se les vincula. Sólo así, podrán convertirse en un tema de seguridad Nacional para el beneficio de los mexicanos.

Nuestras instituciones deben ampliar el concepto que tienen sobre la calidad del agua y el funcionamiento y naturaleza del agua subterránea para integrar al SINA otros indicadores como sustancias químicas, microorganismos patógenos y peligros radiológicos que comprometan la salud humana y el bienestar de los ecosistemas.

Además, resulta fundamental que una vez delimitados los acuíferos bajo los conceptos de la hidrogeología moderna, cada uno cuente con una norma oficial, así, las disposiciones de regulación se verían diferenciadas para el manejo particular de cada uno de ellos.

Una vez hecho esto, se debería expedir una ley general de aguas que establezca de manera clara las competencias que la Federación, entidades federativas y municipios tengan en materia de gestión de recursos hídricos y su papel para prevenir y controlar su contaminación, que busque los mecanismos que permitan la participación ciudadana más allá de un consejo consultivo y que se creen instancias que permitan asegurar el derecho humano al agua y al saneamiento.

Vale la pena resaltar que surge la necesidad de que la Federación, el estado de Yucatán y sus municipios también busquen mecanismos de coordinación para resarcir los daños en la calidad del acuífero, así como aquellos que permitan mejorar la infraestructura relacionada con el saneamiento del agua.

Sólo así, el estado de Yucatán podrá orientar su legislación local a un marco eficiente de la regulación de la contaminación en su única fuente natural de agua potable y en los ecosistemas terrestres, costeros y marinos, en las grutas y cenotes, que le cuentan a quienes los visitan un poco de la historia y la identidad que caracterizan al estado de Yucatán.

Agradecimientos

Alexis Cervantes-Pichardo agradece la beca otorgada por el proyecto PAPIME PE200518 bajo el cual se realizó el presente capítulo.



Cenote Kampepén, ubicado cerca del poblado de Chinquilá, Yucatán. En su interior, por debajo del agua del acuífero, se pueden observar impresionantes espeleotemas como estalagmitas, estalactitas o coladas. Buzo: Juan Baduy. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.

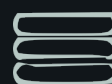
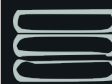
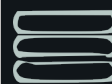
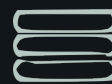
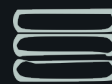


Capítulo 15

Avances en la legislación para la protección de cenotes

Eduardo Adolfo Batllori Sampedro

Centro de Investigación y Estudios Avanzados
(CINVESTAV), unidad Mérida



Introducción

En su reporte para el Estado de Yucatán, Aguilar-Duarte (2009) menciona que de las 4 836 depresiones que ocupan una superficie de 441 km², las dolinas agrupan a 2892 unidades, con una superficie de 25.13 km². Las dolinas presentan forma circular o ligeramente ovalada y se forman a través de puntos de menor resistencia en la roca, es decir, por fallas, fracturas o grietas, presentando alineamientos particulares que siguen las disposiciones regionales y locales, afectando la forma y contorno de las mismas. Por su parte, Thornbury (1983) menciona que las dolinas se pueden obstruir con el tiempo con arcilla acarreada, hasta tal punto que tengan agua por arriba del manto freático y que son éstas a las que se les puede aplicar el término de *lago kárstico*.

Instrumentos jurídicos que regulan la conservación de los cenotes

Derivado de la problemática que se ha presentado en los cenotes por el creciente interés por desarrollarlos turísticamente, así como las consecuencias que los usos actuales urbanos y agropecuarios han tenido sobre la calidad del agua subterránea, la Comisión Nacional del Agua encargó, en el año 2011, al Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA), un estudio para emitir una serie de recomendaciones para el uso, aprovechamiento y conservación de los cuerpos conocidos como *cenotes*, elaborado por los licenciados Alejandra Serrano y Mauricio Madrigal. Es necesario comentar que este estudio es la revisión más completa en materia jurídica sobre estos ecosistemas.

Los autores mencionados hicieron una amplia revisión de más de 30 instrumentos jurídicos, así como de artículos y documentos relacionados con los cenotes, entre los que destaca la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (particularmente los artículos 27 y 115), la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, la Ley de Aguas Nacionales, la Ley General de Asentamientos Humanos, la Ley Minera, La Ley General de Vida Silvestre, la Ley Federal de Desarrollo Forestal Sustentable, la Ley General de Turismo y el Código Civil Federal, así como varias Normas Oficiales Mexicanas, como la NOM-001-SEMARNAT-96, la NOM-003-CNA-96, la NOM-004-CNA-96, la NOM-011-CNA-2000, la NOM-014-CNA-2003, la NOM-022-SEMARNAT-2003 y la NOM-060-SEMARNAT-94. A nivel estatal (Campeche, Yucatán y Quintana Roo) se revisan las leyes correspondientes de Protección al Ambiente, de Asentamientos Humanos, la Ley Orgánica de los Municipios y Ordenamientos Ecológicos Territoriales, locales y/o regionales, según sea el caso. Revisa también la propuesta del sistema de clasificación para el Inventario Nacional de Humedales propuesto por el Instituto Nacional de Ecología, en la perspectiva de definir a los cenotes como humedales subterráneos de la península de Yucatán.

Los autores parten del hecho que, debido a las características físicas de las cavernas y cenotes, se encuentra que los elementos naturales constitutivos de los mismos no son sustancias o elementos de propiedad reservada a la Federación y, por consiguiente, lo son de las entidades federativas, siendo estas últimas las encargadas de su regulación. Por otro lado, los cenotes, al tener como recurso principal el agua subterránea y al ser ésta propiedad reservada de la Federación, corresponde a dicha autoridad su regulación. En este punto, podríamos incluir también lo relacionado con la biodiversidad que en ellos habita.

En materia de competencia concluyen con dos alternativas:

1) Consiste en delimitar las facultades de la Federación, los estados y municipios, de acuerdo con los recursos naturales que integran el ecosistema objeto de estudio (los cenotes). Para lo cual se requiere una caracterización biológica y física especializada de cada uno de los tipos de cenotes. Además de lo anterior, es necesario el establecimiento de mecanismos de coordinación sumamente eficientes y operativos entre los niveles de gobierno, a fin de lograr acciones coordinadas y una protección integral de los mencionados ecosistemas. La anterior alternativa carece de viabilidad, debido principalmente a que en razón a la importancia y especialidad que poseen los cenotes, los mismos deben ser considerados como un único ecosistema, característico de la península de Yucatán, resaltando e incluyendo los diferentes tipos.

2) Consiste en darle un tratamiento integral como humedal y en razón de su importancia, teniendo como base el interés público y el principio precautorio, entre otros, y como fundamento el Artículo 27 constitucional, mismos que, por un lado, establecen la propiedad originaria de la Nación y, por otro, la competencia general de la Federación. De acuerdo con lo anterior, sería la Federación la facultada en términos generales de regular el aprovechamiento sustentable, conservación, protección, preservación, restauración y uso de los cenotes, pudiendo, dadas las circunstancias, suscribir convenios de colaboración, en el momento que se requieran; resaltando el papel fundamental que cumplen los estados y municipios en torno a la prevención y control de la contaminación de los recursos naturales, principalmente del agua.

Es precisamente esta segunda alternativa que los autores, después de realizar el análisis y diagnóstico de los diferentes instrumentos jurídicos, consideran que darle el tratamiento jurídico a cenotes y cavernas como humedales es indispensable y necesario, e incluyen en sus recomendaciones llevar a cabo acciones como la expedición de un Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales en materia de Humedales, que establezca reglas generales aplicables a todos los tipos de humedales, que defina sus diferentes tipos y que establezca un

registro nacional de éstos. Asimismo, sugiere la expedición de una Norma Oficial Mexicana que regule el desarrollo de cualquier actividad en la que se involucre a los humedales subterráneos. De igual forma, recomienda la derogación de todos los artículos que aludan a cenotes y cavernas en el marco jurídico a nivel estatal. Por último, propone instrumentos económicos y fiscales que apoyen y promuevan la conservación de los cenotes y cavernas, así como programas de educación ambiental y programas de apoyo a proyectos productivos.

Propuesta a nivel estatal. El caso de Yucatán

A nivel estatal, los autores mencionados destacan al estado de Yucatán como el más avanzado en términos legislativos, estableciendo, pese a los vacíos legislativos federales, una protección sistematizada de los cenotes y cavernas. En este punto, la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán cuenta con el Capítulo II, sobre las disposiciones relativas a la protección, restauración de los ecosistemas existentes en los cenotes, cuevas y cavernas, a partir del Artículo 64 al 67, así como un Reglamento de la Ley de Protección al Medio Ambiente del Estado de Yucatán en materia de Cenotes, Cuevas y Grutas, expedido mediante el Decreto 193/2014 y publicado en el Diario Oficial, con fecha 17 de junio de 2014. Cuenta además con una estructura administrativa a nivel de Jefatura de Departamento de Sistemas Kársticos con presupuesto asignado para tratar los asuntos relacionados con cenotes, cuevas y grutas, el censo de estos ecosistemas (con un registro de más de 2700 cenotes, abiertos cerrados y asociados a cavernas), su conservación y restauración (existe un programa específico para estas acciones), inspección y vigilancia, así como su participación en la evaluación en materia de impacto ambiental de las propuestas de desarrollo. Se cuentan con áreas naturales protegidas como la Reserva Estatal Lagunas de Yalahau, que representa una depresión kárstica tipo uvala, la recién creada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes, la inscripción de 99 cenotes del Anillo como Humedales de Importancia Internacional Ramsar y la propuesta del Anillo de Cenotes del Cráter de Chicxulub como Patrimonio Natural de la Humanidad.

Se ha definido a nivel estatal como prioritaria la Zona Geohidrológica del Anillo de Cenotes, que incluye el territorio del acuífero más importante de Yucatán, así como los sumideros kársticos, grutas asociadas, aguadas, cubetas de disolución y lagos kársticos, conformada en función de sus características morfológicas, hidrológicas y geológicas, la cual se considera como la unidad básica para la gestión integral de los recursos hídricos, cuya finalidad es el agrupamiento y sistematización de la información, análisis, diagnósticos, programas y acciones en relación con la ocurrencia del agua en calidad y cantidad, así como su explotación, uso, aprovechamiento y mantenimiento de servicios

ambientales. Para tal fin se ha constituido el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Anillo de Cenotes (COTASMEY), vinculado al Consejo de Cuenca de la península de Yucatán, y cuenta con la representación de los usuarios del agua y una gerencia operativa, con recursos federales y estatales asignados.

Para completar este marco legislativo estatal, se ha propuesto el siguiente escenario:

De acuerdo con el Artículo 27, párrafo quinto, de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, son aguas de competencia federal aquellas contenidas en lagunas costeras, ciénagas y ecosistemas de manglar, sabanas y selvas inundables, así como manantiales costeros.

Dada la naturaleza kárstica de Yucatán, no existen ríos superficiales, por lo que el agua pluvial precipitada se infiltra al acuífero eocénico y miocénico-pliocénico, recargando las aguas del subsuelo y promoviendo a su paso el desarrollo de sumideros kársticos (dolinas, uvalas, poljes y cubetas de disolución) que dejan al descubierto o no las aguas subterráneas. En Yucatán, estas aguas subterráneas se encuentran en veda por tiempo indefinido para su alumbramiento, extracción y aprovechamiento, por lo que se sujeta a las disposiciones de la Ley de Aguas Nacionales, reconociéndose como de dominio público de la Federación (que de otra manera serían de libre alumbramiento por el propietario del predio); sin embargo, el proceso de disolución de la roca calcárea que se desarrolla hacia abajo sin afectar la cubierta de suelo o roca superficial, o mediante su colapso dejando los lados empinados o abruptos, con roca de naturaleza calcárea (mineral no reservado a la Federación), no se definen en los bienes públicos inherentes mencionados en el Artículo 113 de la Ley de Aguas Nacionales, por lo cual las deja fuera del ámbito de aplicación de los cuerpos de agua que describe y, por lo tanto, no se encuentran sujetos al régimen del dominio público de la nación. De esta manera, los sumideros kársticos definidos como dolinas, cubetas de disolución, uvalas y poljes se considerarán parte integrante de la propiedad de los terrenos, así como las aguadas y lagos kársticos que se inundan por efecto de la precipitación pluvial se considerarán como parte integrante de la propiedad de los terrenos en los que se encuentren sus depósitos, pero si se localizaren en dos o más predios, el aprovechamiento de estos sumideros kársticos, de aguadas y lagos kársticos se considerará de utilidad pública, y quedará sujeto a las disposiciones que dicte el estado de Yucatán.

Como lo establece Rodríguez-Hernández (2009), aunado a lo que establece el Código Civil del Estado de Yucatán y de acuerdo con su Artículo 589, se reconocerá a la roca sedimentaria de tipo calcáreo de los cenotes (sumideros kársticos) y aguadas ubicados dentro de los

terrenos de propiedad particular que se hayan formado o se formen, ya sea de manera natural o artificial, como un bien inmueble.

El régimen de propiedad de la roca sedimentaria de tipo calcáreo de los cenotes (sumideros kársticos) y las aguadas estará sujeto al que corresponda a los terrenos dentro de los cuales se encuentran (sean particular, agrario, fundo legal o del dominio público), con las limitaciones y modalidades que establezca esta propuesta de ley y otros ordenamientos estatales, federales y municipales, pero sus aguas subterráneas estarán regidas, en su caso, por la legislación federal en materia hídrica cuando el ejecutivo federal las reglamente o decrete su veda. La roca sedimentaria de tipo calcáreo de los cenotes (sumideros kársticos) que se encuentren en terrenos considerados de propiedad particular, estará regida por este régimen de propiedad, siendo susceptibles de ser enajenados o de trasladarse el dominio conforme a las disposiciones contenidas en el Código Civil del Estado de Yucatán y en las demás disposiciones administrativas que regulan dichos inmuebles.

El derecho de uso, explotación o aprovechamiento de las aguas subterráneas lo tendrá el propietario o poseedor del inmueble en donde se ubique la fuente o aprovechamiento, pero de haberse reglamentado o declarado veda por el ejecutivo federal dichas aguas, se observará la legislación administrativa aplicable. Conjuntamente con la transmisión de la propiedad o posesión del inmueble en donde se ubique la fuente o aprovechamiento, se transmitirán, en su caso, los derechos de uso, explotación o aprovechamiento de las aguas subterráneas y superficiales derivadas de aguas pluviales en las aguadas, sea en forma definitiva o temporal, total o parcial.

El propietario o inquilino de un predio tiene derecho de ejercer las acciones que procedan para impedir que por el mal uso de la propiedad del vecino y que por efectos de la contaminación que ejerza sobre las aguas subterráneas, se perjudiquen la seguridad, el sosiego o la salud de los que habiten el predio como establece el Artículo 666 del Código Civil del Estado de Yucatán (Rodríguez-Hernández, 2009), podrá demandar el pago de los daños y perjuicios por la responsabilidad civil que se cause al patrimonio, persona o familia por el mal uso de la propiedad o posesión de un inmueble que realice otra persona. Se presume que se hace un mal uso de la propiedad o posesión de un inmueble, cuando las autoridades administrativas competentes hayan impuesto alguna sanción que haya quedado firme o cuando se haya sentenciado al propietario o poseedor por una conducta tipificada como delito, por no observarse las limitaciones y modalidades impuestas a la propiedad por las leyes, reglamentos, normas oficiales y demás disposiciones aplicables, sin que se haya corregido la conducta que generó la infracción.

En materia notarial, además de lo dispuesto en el Artículo 95 de la Ley de Notariado del Estado de Yucatán, en toda acta notarial se observará como requisito el hacer constar el hecho de contar con cenotes (sumideros kársticos) y aguadas, y se describirán sus características, para lo cual el notario o escribano indagará con los propietarios o poseedores si existe alguna concesión o asignación otorgada por la autoridad competente cuyos derechos deban ser transmitidos, ya sea en forma definitiva o temporal, parcial o total (Rodríguez-Hernández, 2009). En caso de existir derechos de uso, explotación y aprovechamiento de aguas subterráneas declaradas en veda o reglamentadas en un inmueble, conjuntamente con la transmisión de la propiedad o posesión, se transmitirán dichos derechos, señalando los datos de la concesión respectiva y si dicha transmisión se realiza de forma definitiva, total o parcial, comunicando este hecho a la autoridad hídrica competente estatal y federal dentro de los 15 días hábiles siguientes a la formalización del contrato, así como a la oficina del registro público de derechos de agua en el estado.

Para efectos de la Ley de Catastro del Estado de Yucatán se entenderá como parte de la definición de predio a la roca sedimentaria de tipo calcáreo de los cenotes (sumideros kársticos), cavernas que se hayan formado en el terreno, los pozos y demás obras de alumbramiento de aguas subterráneas que se construyan en el mismo o en las aguadas o lagos kársticos existentes (Rodríguez Hernández, 2009). Por lo que la determinación de las zonificaciones catastrales y de valores unitarios de suelo aplicables en los sectores de las áreas urbanas y rústicas, se hará atendiendo también a los cenotes (sumideros kársticos), aguadas y lagos kársticos que se hayan formado o construido en el terreno del predio.

En materia del Reglamento del Registro Público de la Propiedad del Estado de Yucatán, además de lo establecido en el Artículo 61, párrafo III, se incluye el hecho de que al haber pozos o cenotes (sumideros kársticos), aguadas o lagos kársticos, se hará constar la existencia de éstos, sin perjuicio del aviso que se haga, en su caso, al registro público de derechos de agua.

Reflexiones finales

Queda claro entonces que los recursos naturales en México, desde la perspectiva del Estado, se basan en un enfoque patrimonialista. Esto es particularmente claro en el Artículo vigésimo séptimo de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (Cámara de Diputados, 2004). En el momento en que en la carta magna se estipula que los recursos naturales pertenecen a la Nación, surge el concepto jurídico de patrimonio natural, y con él se genera la paradoja que enfrentan actualmente las tareas de conservación de los recursos bióticos presentes en el territorio del país: como son patrimonio nacional, no son

propiedad de persona física o moral alguna (son “de todos y de nadie”), el Estado se abroga la facultad de custodiarlos o de autorizar su usufructo. Es entonces custodio del patrimonio natural mexicano y, por tanto, garante de su conservación.

Pero el Estado es también el primer promotor y el rector del desarrollo del país. Independientemente de qué se entienda por desarrollo, lo cierto es que su base material está en los recursos naturales, en los servicios ambientales disponibles y en los atributos ecológicos y culturales del territorio nacional. Esto puede parecer algo evidente. Sin embargo, el doble papel del Estado ante el ambiente (como conservador y promotor de la explotación de sus recursos) lo enfrenta a un dilema que se debe resolver en el diseño y la instrumentación de un modelo concreto de desarrollo: las instituciones, a cualquier nivel, no pueden modificar las exigencias que imponen las condiciones (físicas y biológicas) del entorno, pero sí deben ser capaces de determinar las formas en que la sociedad se apropie de los recursos que el entorno le ofrece.

Las disposiciones jurídicas en materia ambiental y urbana se sustentan en las mismas bases constitucionales. Y ello es así porque el sustento de la normatividad respectiva está constituido por principios fundamentales que se ubican por encima de intereses privados o particulares: la satisfacción de derechos sociales o públicos orientados a generar las condiciones necesarias para que las personas disfruten de un entorno adecuado para su desarrollo, salud y bienestar.

El hecho de que nuestro marco constitucional incorpore disposiciones en esas materias es fundamental, si consideramos el principio de “Supremacía de la Constitución”, que se deriva de su Artículo 133, según el cual toda regulación que forme parte del sistema jurídico mexicano debe sustentarse en las prescripciones de nuestra Carta Fundamental. Es decir, mientras más completas sean las bases constitucionales del derecho ambiental y urbano en nuestro país, mejores herramientas jurídicas podrán desarrollarse para preservar el equilibrio ecológico y proteger el ambiente y llevar a cabo la ordenación de los asentamientos humanos.

Las disposiciones jurídicas que constituyen las bases constitucionales de la legislación ambiental y urbana están contenidas en los artículos 4, 25, 27 y 73, que se refieren a ambas materias en forma integral, como podremos observar más adelante. Sin embargo, no hay que desconocer que el propio texto constitucional incluye otras disposiciones que se relacionan de manera más específica con aspectos ambientales, de recursos naturales o de ordenamiento territorial, como es el caso de la regulación de las aguas nacionales, propiedad minera, salubridad general, zona económica exclusiva, aprovechamiento de los hidrocarburos, actividad pesquera, atmósfera, etcétera.

A continuación describiremos las disposiciones que constituyen las bases constitucionales del derecho ambiental mexicano.

a) Artículo 4º Constitucional. En 1998, durante el segundo periodo de sesiones del Congreso de la Unión, se aprobaron las modificaciones al Artículo 4º de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. En el primero de los preceptos, en su párrafo quinto, se estableció que “Toda persona tiene derecho a un medio ambiente adecuado para su desarrollo y bienestar”. Lo anterior redundaba en un mayor beneficio para toda la sociedad y genera acciones dirigidas a la protección y resguardo de esta garantía constitucional.

b) Artículo 25 Constitucional. En este precepto se incluyen dos disposiciones que son consideradas como fundamento constitucional del marco jurídico ambiental y urbano en México: la primera de ellas está contenida, desde 1983, en el párrafo sexto del precepto, en donde se establece lo siguiente:

Bajo criterios de equidad social y productividad se apoyará e impulsará a las empresas de los sectores social y privado de la economía, sujetándolos a las modalidades que dicte el interés público y al uso, en beneficio general, de los recursos productivos, cuidando su conservación y el medio ambiente.

Es decir, las actividades productivas pueden limitarse o restringirse cuando puedan ser contrarias a los intereses públicos, sociales o nacionales, de acuerdo con las disposiciones jurídicas que en su caso resulten aplicables.

La segunda disposición del Artículo 25 Constitucional, que forma parte de las bases constitucionales del derecho ambiental y urbano, está prevista en su primer párrafo. Como ya se mencionó, en diciembre de 1998, se modificó ese párrafo para quedar como sigue:

Corresponde al Estado la rectoría del desarrollo nacional para garantizar que éste sea integral y sustentable, que fortalezca la soberanía de la Nación y su régimen democrático y que, mediante el fomento del crecimiento económico y el empleo y una más justa distribución del ingreso y la riqueza, permita el pleno ejercicio de la libertad y la dignidad de los individuos, grupos y clases sociales, cuya seguridad protege esta Constitución.

La reforma a este precepto es importante porque establece que el desarrollo nacional debe tener un carácter sustentable, lo que implica que los principios y lineamientos que orienten la actividad gubernamental deberán considerar la preservación del equilibrio ecológico, la protección al ambiente y el ordenamiento territorial.

Una de las críticas que ha prevalecido sobre la gestión ambiental desarrollada por el Gobierno Federal y los gobiernos locales ha sido su carácter parcial o sectorial y, por tanto, su falta de transversalidad en toda la administración pública. La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, a través de sus reformas de 1996, estableció la obligatoriedad de las dependencias y entidades de la Administración Pública Federal, de que en el ejercicio de sus atribuciones y el desarrollo de sus programas se atiendan los criterios, lineamientos y disposiciones que la propia ley establece. Disposiciones similares prevé la Ley General de Asentamientos Humanos y las leyes estatales de desarrollo urbano.

c) Artículo 27 Constitucional. Indudablemente éste es uno de los preceptos más importante de los que constituyen las bases constitucionales del derecho ambiental y urbano en nuestro país, en virtud de los alcances de sus disposiciones y de los efectos de éstas sobre la realización de actividades que generen o puedan generar efectos adversos al ambiente o los recursos naturales. Este precepto, desde su texto original de 1917, permitía regular conductas encaminadas a la protección ambiental y al ordenamiento de territorio, aunque no con el carácter integral con el que lo hace en su texto vigente, donde destacan dos disposiciones previstas en sus párrafos primero y tercero.

En el primer caso, el Artículo 27 constitucional expresa que: “La propiedad de las tierras y aguas comprendidas dentro de los límites del territorio nacional, corresponde originariamente a la Nación, la cual ha tenido y tiene el derecho de transmitir el dominio de ellas a los particulares, constituyendo la propiedad privada”. De ese primer párrafo destacan dos normas: la que otorga a la Nación la titularidad originaria de tierras y aguas, y la que establece el derecho de propiedad privada como un derecho derivado, secundario, precario. Lo anterior significaba negar la naturaleza del derecho de propiedad privada que hasta ese momento había prevalecido en nuestro sistema jurídico; se desconoce el carácter de la propiedad como un derecho natural, anterior y superior a cualquier otro derecho, y se sustituye por un derecho que tiene una función social o que debería cumplir una función social.

Llevar a cabo un análisis o descripción pormenorizada de las implicaciones históricas, económicas, sociales, jurídicas de este precepto rebasa con mucho las peculiaridades de este trabajo. Sin embargo, basta decir que esta disposición es el eje de regulación del ejercicio del derecho de propiedad en nuestro sistema jurídico desde 1917 y que entre sus alcances destaca el hecho de que el ejercicio del derecho de propiedad que corresponde a las personas, siempre estará supeditado al interés de la Nación, como la titular originaria de cualquier tipo de derecho sobre tierras y aguas en el territorio nacional.

Ello implica que la extensión del derecho de propiedad en la realización de cualquier actividad productiva estará limitada por los intereses que la Nación tenga y que se expresen en la propia Constitución Política y en las leyes que deriven de ella. Y es ahí justamente cuando adquiere relevancia el tercer párrafo del Artículo 27 del ordenamiento que comentamos. En efecto, en él se expresa lo siguiente:

La Nación tendrá en todo el tiempo el derecho de imponer a la propiedad privada las modalidades que dicte el interés público, así como el de regular, en beneficio social, el aprovechamiento de los elementos naturales susceptibles de apropiación, con objeto de hacer una distribución equitativa de la riqueza pública, cuidar de su conservación, lograr el desarrollo equilibrado del país y el mejoramiento de las condiciones de vida de la población rural y urbana. En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para [...]

Estas previsiones permiten restringir, limitar, regular el ejercicio del derecho de propiedad cuando, en el desarrollo de actividades o procesos productivos, se pretenda hacer prevalecer los intereses superiores de la sociedad, de la colectividad o de la Nación, sobre intereses o derechos subjetivos, individuales. Además, se establece el derecho de regular los elementos (recursos) naturales susceptibles de apropiación para cuidar de su “conservación”.

Por otra parte, en 1987, se modifica el párrafo tercero que venimos comentando, para establecer lo siguiente: “[...] En consecuencia, se dictarán las medidas necesarias para [...] preservar y restaurar el equilibrio ecológico [...]”

Con ello, se incorpora al texto constitucional la previsión que obliga al Estado a adoptar acciones y programas encaminados al cumplimiento de los fines citados, es decir, la imposición de modalidades a la propiedad y la regulación del aprovechamiento y la conservación de los recursos naturales se vinculan a la preservación y restauración del equilibrio ecológico. A partir de ello, la legislación en las materias respectivas, paulatinamente, tenderá a adquirir un carácter integral, holístico, que pretende regular, bajo una misma orientación, los diferentes elementos naturales y sociales que interactúan y que propician la vida en todas sus formas.

Pese a lo anterior, el contexto nacional que ha caracterizado a México, es ser uno de los países con un muy alto nivel de centralismo y con mayor sobrerregulación en la administración de recursos naturales, en donde, paradójicamente, los costos de transacción de la producción sustentable son más altos que los de la producción insustentable (Castañares, 2009), y en este sentido trabaja la propuesta elaborada desde la perspectiva de la Comisión Nacional del Agua y el Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA), que en materia de

competencia tiende a darle a los cenotes el tratamiento de humedal, con todas las facultades dadas a la Federación, pudiendo suscribir convenios de colaboración con los estados y municipios en torno a la prevención y control de la contaminación de los recursos naturales, principalmente el agua. Incluyen la expedición de un Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales en materia de Humedales, que defina y constituya reglas generales aplicables a todos los tipos de humedales, y que establezca el registro nacional de éstos. Asimismo, sugiere la expedición de una Norma Oficial Mexicana que regule el desarrollo de cualquier actividad en la que se involucre a los humedales subterráneos.

De igual forma recomienda la derogación de todos los artículos que aludan a cenotes y cavernas en el marco jurídico a nivel estatal. Por último propone instrumentos económicos y fiscales que apoyen y promuevan la conservación de los cenotes y cavernas, así como programas de educación ambiental y programas de apoyo a proyectos productivos.

Esto es un ejemplo de cómo las perspectivas disciplinarias y especializadas de la academia se reproducen a su vez en aplicaciones sectorizadas y programas especializados de la administración pública, particularmente en la administración pública ambiental. Es importante reconocer que las funciones que corresponden a una administración pública encargada de lo ambiental global no pueden ser consideradas como un sector más dentro de la Administración Pública Federal, en paridad de condiciones con las secretarías responsables, por ejemplo, de sectores productivos. El medio ambiente no es un sector, sino una dimensión que permea todos los sectores. Su administración corta transversalmente las funciones de los sectores de la Administración Pública Federal (Laurelli, Pírez y Castañares, 1990). Para lograr los enfoques holísticos, integrales y sistémicos; de acuerdo con Enrique Leff (1986), es necesario cuestionar las formas de institucionalización y legitimación de un saber fraccionado aplicado en las funciones sectorializadas de la planificación y de la administración pública. La administración ambiental, como un sector más, dejaría de ser válida si el desarrollo sustentable fuese una política de estado. Pero al no serlo, la administración ambiental trabaja en una institucionalidad débil que hace muy difícil el cumplimiento de programas, leyes, normas y reglamentos. No hay una coordinación entre programas gubernamentales, mientras que en el sector ambiental se promueven acciones de conservación de la biodiversidad, desde otros sectores, como el agropecuario, industrial, minero o urbano, se promueven actividades que erosionan y degradan dicha biodiversidad. Programas desarticulados cuando no en franca contradicción. Los problemas no resueltos de intersectorialidad se dan a todos los niveles, no sólo entre secretarías, sino al interior de ellas, en razón de que no es equivocado decir que el gobierno mexicano, conforme a su incorporación en las tesis de planeación nacional (Artículo

26 constitucional), es un gobierno por programas, más que un gobierno por políticas, lo que significa, en la práctica, que exista el riesgo frecuente que no todos los programas de un sector sean coherentes, complementarios y acumulativos como para poder establecer que son componentes que integran una política pública, ambiental en este caso (Castañares, 2009).

d) Artículo 73 constitucional. Como se sabe, este precepto establece las diferentes materias en las que el Congreso de la Unión es competente para legislar. Las fracciones XXIX-C y XXIX-G del Artículo 73 constitucional expresan que el citado órgano legislativo es competente:

Para expedir leyes que establezcan la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, en materia de asentamientos humanos, con objeto de cumplir con los fines previstos en el párrafo tercero del Artículo 27 de esta Constitución; protección al ambiente y de preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Al margen del contenido normativo de las distintas materias que se contemplan en la Ley General de Asentamientos Humanos (LGAH) y en la Ley General del Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA), conviene señalar que, en el caso del último de los ordenamientos, una de sus características fundamentales es la descentralización de funciones a favor de los gobiernos locales.

Para descentralizar la materia y para propiciar la participación de los gobiernos locales en la atención a las problemáticas ambientales que se presentan en sus circunscripciones territoriales, la LGEEPA les otorgó diversas facultades. A partir de la expedición de esa Ley, todas las entidades federativas del país emitieron sus propias leyes locales en materia ambiental (como es el caso de los estados que conforman la península de Yucatán) y, cada vez más en espacios "reservados exclusivamente" a las autoridades federales, exigen hoy una mayor participación, como es el caso del estado de Yucatán.

En la toma de decisiones de la gestión ambiental (aunque no se limita sólo a ésta) es pertinente distinguir tres tipos de decisiones: estratégicas, tácticas y operativas. Éstas están asociadas a cada nivel de organización del sistema. En cada uno de estos niveles encontramos actores con dinámicas e intereses que generan procesos distintos (Castañares, 2009). Los procesos de primer nivel se refieren a los cambios producidos en el ambiente físico local (tanto por fenómenos naturales como sociales), en los métodos de producción (uso social de los paisajes: cenotes, cavernas, turismo, porcicultura, etc.), en las condiciones de vida y las relaciones socioeconómicas (cadenas y redes productivas).

En el segundo nivel, los procesos principales se refieren a las políticas regionales y nacionales como los programas de conservación ambiental, desarrollo comercial, turístico y agroindustrial con transgénicos. En el tercer nivel se plantean todas aquellas políticas conservacionistas y de desarrollo nacionales e internacionales, como Ramsar, el Programa de Reducción de Emisiones por Degradación y Deforestación (REDD+), el programa turístico Mundo Maya, el Plan Puebla-Panamá, la Plataforma Logística del Puerto de Altura de Progreso y el programa ambiental del GEF/Banco Mundial para la protección de la biodiversidad y el desarrollo sustentable en áreas no protegidas, a través de corredores biológicos, entre otros. Lo que predomina, sin embargo, es que la toma de decisiones se dan de forma aislada, unas no toman en cuenta a las otras a pesar de los controles administrativos, de manera que el resultado sea una detonación de acciones operativas que no van en una misma dirección. Por el contrario, cuando la toma de decisiones tiene mecanismos de interacción entre los niveles de decisión, es posible que éstas se acoplen para dar origen a acciones integrables, esto es, que sean acciones coherentes, complementarias y acumulativas.

Una observación general para la discusión sobre el espacio de toma de decisiones estratégicas es que el proyecto no debe quedar "grabado en piedra", se debe dar oportunidad a que este espacio de negociación esté abierto de manera recurrente para poder llevar a cabo una planeación adaptativa alimentada por las experiencias de los actores en la toma de decisiones tácticas y operativas. De no ser así, se acaba por priorizar lo administrativo antes que lo sustantivo del proyecto (Castañares, 2009). Un modelo político de gestión ambiental adquiere sentido con soluciones a problemas que identifiquen actividades productivas dentro de la capacidad de los ecosistemas para que se mantengan a largo plazo. Por ello la especificidad regional es necesario tomarla en cuenta desde un principio, y sólo será posible si se aborda la complejidad de la gestión ambiental situándola en contextos concretos (García, 1986), respondiendo a la dinámica regional.

El modelo de gestión ambiental se diseña con los planteamientos realizados desde la toma de decisiones estratégicas, pero no es hasta la toma de decisiones tácticas donde las acciones se organizan con una visión de conjunto regional, fomentando la descentralización. Los convenios de colaboración en que los titulares de dependencias estampan su firma demuestran nulos o escasos resultados si no se establece de manera explícita la participación de los involucrados en los niveles táctico y operativo. Las estrategias sectoriales se coordinan en el nivel táctico para hacer posibles las acciones integradas por el nivel de toma de decisiones operativas. Las decisiones tácticas articulan las decisiones estratégicas y operativas.

Quienes actúan en este nivel de decisiones tienen la difícil tarea de negociar con dos tipos de actores con dinámicas muy distintas, la mayoría de las veces. Los actores del contexto estratégico tienen intereses generales, con una dinámica determinada por la institucionalidad, principalmente el ejercicio del presupuesto; por otra parte, los actores de los niveles operativos tienen intereses específicos, con una dinámica determinada por los ciclos anuales y el acceso a los mercados. Esto hace que la conciliación de intereses y dinámicas sea una tarea difícil de realizar.

De ahí que las iniciativas a nivel regional y local deben ser apoyadas y fortalecidas. No es posible derogar las leyes y reglamentos que toquen, en este caso, lo relativo a la conservación y aprovechamiento de los cenotes y cavernas, después de un proceso histórico de negociación con los actores locales, de incorporar a nivel de estructura en las instituciones ambientales estatales áreas dedicadas exclusivamente a sistemas kársticos, al reconocimiento de los cenotes como humedales y su inscripción en el Convenio de Ramsar, a instancias con capacidad operativa como el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Anillo de Cenotes, a la creación de áreas naturales protegidas como la Reserva Estatal Geohidrológica Anillo de Cenotes y a la conformación de alianzas intermunicipales para la gestión ambiental de dicha área, así como detener el proceso de modificaciones en el Código Civil, Ley de Notariado y el reconocimiento ante el catastro y registro de cenotes y cavernas.

La experiencia ha demostrado que hay una alta posibilidad de éxito de conservar la biodiversidad con la participación de la comunidad local, cuando existe un entorno (condiciones de contorno en términos sistémicos) favorable y se sientan las bases para integrar mecanismos innovadores de política ambiental para la conservación y mejoramiento de los servicios de los ecosistemas de alta prioridad para el bienestar social, en este caso, los cenotes y cavernas, como lo muestra Eric Castañares (2009) en su modelo del corredor biológico mesoamericano: la práctica científica interdisciplinaria y la práctica política integradora.

El modelo para la práctica científica interdisciplinaria se constituye por la triada de un colectivo multidisciplinario, un modelo de sistema complejo y el objeto de estudio complejo. El segundo componente, la práctica política integradora, se forma por la triada de un colectivo de actores, modelo de gestión ambiental y el objeto de gestión ambiental. Para que estos dos componentes triádicos del modelo sean complementarios y se retroalimenten, el objeto de estudio complejo y el objeto de gestión ambiental deben ser coincidentes.

Esta unidad de análisis científica y de gestión concurrente se denomina desde la perspectiva sistémica *Sistema Ambiental* y en el caso que nos ocupa, lo denominamos *Sistema Ambiental para la conservación y aprovechamiento de cenotes y cavernas y área de influencia* (**Figura 1**).

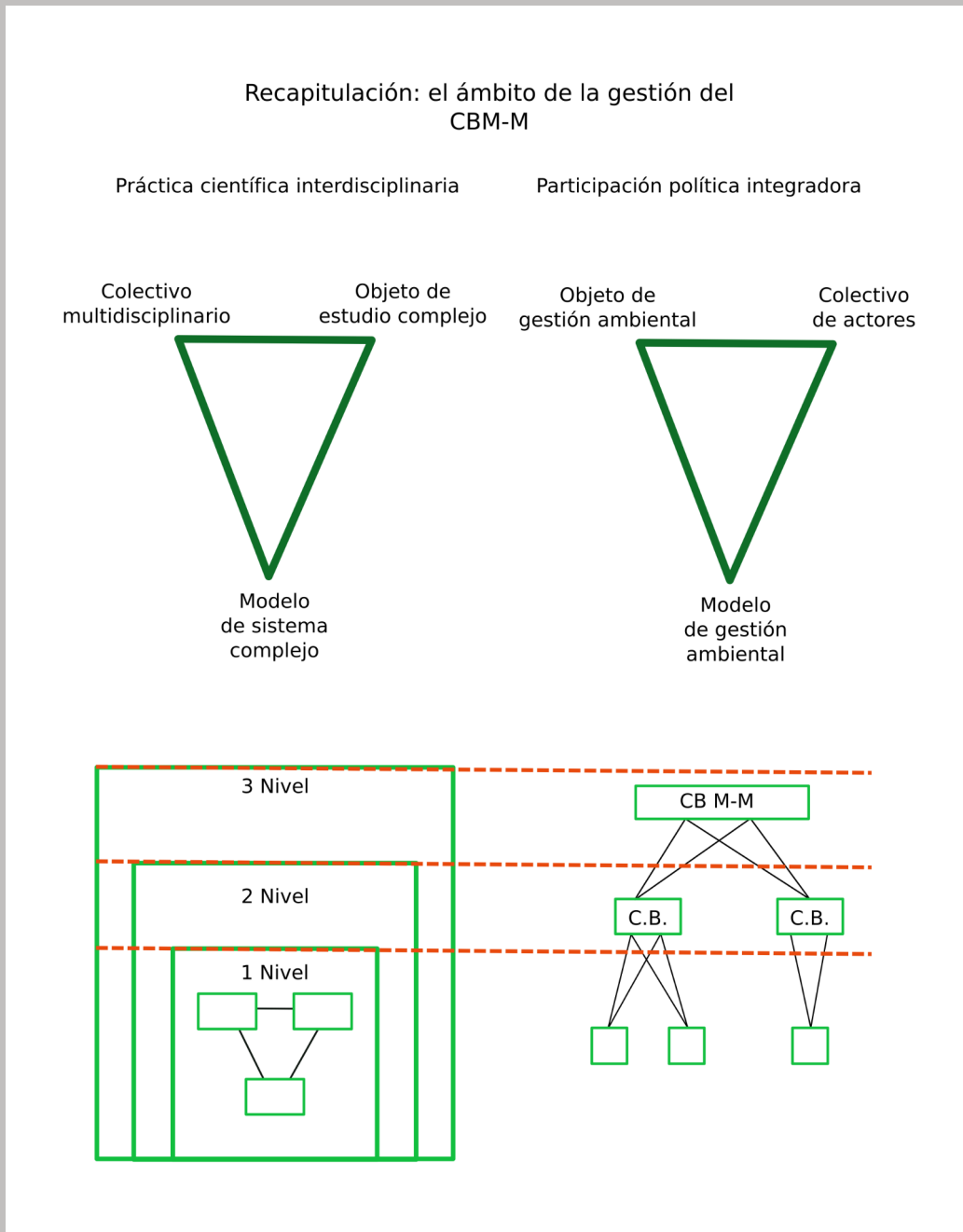



Figura 1. Recapitulación: el ámbito de gestión ambiental del CBM-M.

Elizabeth Dowdeswell, Directora Ejecutiva del Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), al dirigirse a la Cumbre Mundial para el Desarrollo Social, en Copenhague en 1995, dijo:

en primer lugar, nuestra definición fundamental de desarrollo debe cambiar. Ya no puede ser considerado simplemente como un problema de cómo modernizar a las sociedades tradicionales. No debería ser una simple duplicación del desarrollo intensivo en recursos y energía que siguen las naciones desarrolladas. Debe reconocer las circunstancias locales, el potencial para el crecimiento generado internamente, y la contribución de las instituciones y el saber tradicional. Debe estar inherentemente apuntado hacia la sustentabilidad (Furze, 1996).



 *Cenote X'batún, ubicado en el poblado de San Antonio Mulix, Yucatán. La cooperativa Tumben Zazil Kin Zonot cuida y administra este cenote abierto. Es muy llamativo por su agua color turquesa y la vegetación que lo rodea. Buzo: Juan Baduy. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*

Capítulo 16

El lado oscuro del universo maya

Guillermo de Anda Alanís

Coordinación de Arqueología, Responsable de proyectos
especiales de arqueología Subacuática, INAH

Introducción

En este trabajo, pretendo dar claridad sobre la importancia que las cuevas y cenotes tenían para los antiguos mayas, desde diversos puntos de vista. Trataré de equilibrar la percepción que se tiene de estos fascinantes lugares, su función e incluso desmitificar algunos aspectos que han prevalecido en las ideas que el público en general se ha hecho de estos sitios. Tratar de contrastar, por ejemplo, conceptos coloquiales que han considerado a las cuevas y cenotes como simples repositorios de agua para beber o para llevar a cabo tareas domésticas como “lavar la ropa”, tal y como algunos autores lo han afirmado. La idea que coloca a las cuevas y cenotes como lugares repletos de restos humanos producto de sacrificios masivos tampoco es muy aceptada, incluso se cree que estos lugares están llenos de maravillosos “tesoros” entre los que se incluyen grandes cantidades de oro. Las cuevas y cenotes son sitios con una riqueza científica y una complejidad mucho mayor. Son, de hecho, sitios tan importantes para el desarrollo de la civilización maya que, para entender de manera cabal a esta antigua sociedad, debemos empezar por estudiar esos elementos que le dieron vida a su visión del mundo, a sus mitos, a sus rituales y a su religión. En suma, cuando hablamos de estos sitios, debemos considerarlos la esencia de lo divino, alrededor de la cual los mayas antiguos desarrollaron una compleja y extraordinaria sociedad.

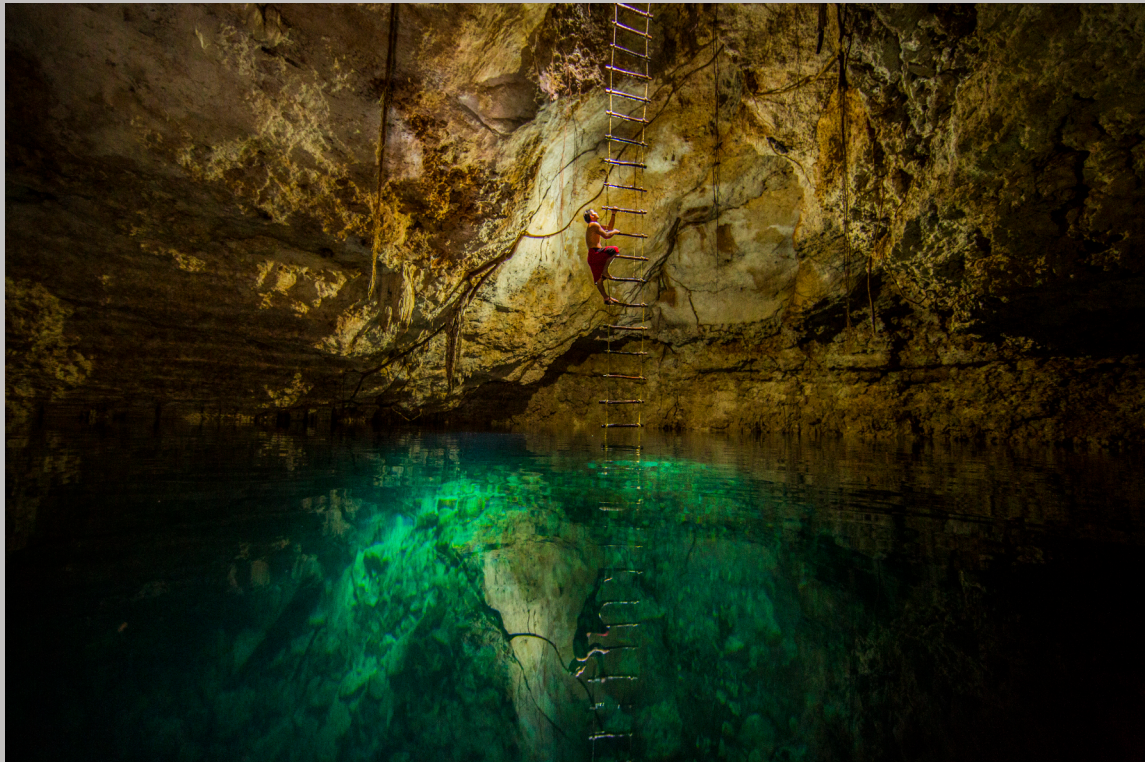


Figura 1. Los cenotes son cuevas inundadas características de la península de Yucatán. No solamente son bellos, sino que contienen información científica única. Foto: Paul Nicklen/Archivo Proyecto Gran Acuífero Maya (GAM).

Cuevas, primeros pobladores de América y fauna extinta

Las cuevas y cenotes son uno de los rasgos naturales más característicos y abundantes de la península de Yucatán (**Figura 1**). Si bien, a la fecha, no tenemos un registro exacto del número de estas oquedades naturales, un censo de cenotes llevado a cabo por la que fuera la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología (SEDUMA) del estado de Yucatán, arrojó una cantidad cercana a los tres millares. Teniendo esto en cuenta y de manera muy preliminar, podríamos estimar que Quintana Roo (donde no se ha llevado aún un censo similar al de Yucatán), contenga cuando menos un número equivalente, lo que nos llevaría (sin tomar en cuenta al estado de Campeche), a una cifra mínima de 6000 cenotes en la península. Sin embargo, me parece que este número podría ser conservador. Lo que sí sabemos de manera muy exacta es que, debajo de la superficie del estado de Quintana Roo, yacen enormes sistemas de cuevas aún por descubrirse. Para poner un ejemplo de lo anterior, si tomamos en cuenta solamente un pequeño transecto de la morfología peninsular, es decir, el tramo que va de la población de Playa del Carmen a Tulúm, sabemos con certeza que existen cuando menos, unos 1600 km de cuevas inundadas, mapeadas hasta el momento (QRSS, 2019).

Este importante número de cuevas y cenotes, y el agua que en menor o mayor grado han contenido durante miles de años, han sido un factor fundamental para el sustento de la vida en la península. Gracias a las exploraciones en las cuevas y al advenimiento de nuevos equipos y técnicas para bucear en ellos, hemos aprendido que en esta zona de nuestro país, hubo hombres muy tempranos que interactuaban con los sistemas de cuevas hace cuando menos 10000 años y que deben haber llegado de Asia, ya sea a través del Estrecho de Bering o por alguna de las otras rutas que se especula pudieron haber servido para el arribo de los primeros hombres al continente americano. Lo anterior debido a algunas características morfológicas y a la temprana época (12900 A.P.) en la que, como se ha comprobado, habitaban ya la península. Se teoriza de un arribo de estos grupos por alguna vía marina, aunque, como anoto líneas arriba, esto es sumamente polémico y sigue pendiente aún de corroboración. Es interesante atestiguar cómo la exploración e investigación de las cuevas de la península han cambiado la información de los libros de historia y podrían dar respuesta a preguntas relativas sobre las rutas usadas por los primeros americanos. La biogeografía antigua de la zona se nos revela también, a través de los restos de fauna ya extinta y en algunos casos desconocida para esta zona. La presencia de restos de hombres y animales que yacen en alguna parte de los sistemas de cuevas nos muestran, entre otras muchas cosas, la importancia que han tenido estos sitios a través de un largo período de tiempo. Creemos que esta relación de hombres y animales con las cuevas se da fundamentalmente por algunos factores entre los que podrían estar: la presencia de agua dentro de ellos y que

era utilizada tanto por hombres como por la fauna; su probable uso como sitios de refugio o para la obtención de algunos materiales, sitios considerados como sagrados y a los cuales se concurría para llevar a cabo rituales; servir como observatorios astronómicos y una última función, no menos importante, pudo haber sido la de fungir como lugares de control y legitimación política para los mayas antiguos. En este sentido, las cuevas desde épocas tempranas trascienden la mera utilidad práctica para convertirse en los primeros santuarios naturales de América. Es muy probable que dentro de estas zonas de oscuridad eterna hallan surgido los inicios de la ritualidad en Mesoamérica. Dada la temprana interacción que el hombre tuvo con las cuevas, he propuesto que las primeras manifestaciones rituales se llevaron a cabo dentro de ellas y que algunos de los remanentes materiales de estas actividades, registrados dentro de algunas cuevas, podrían ser una manifestación del origen de la ritualidad. Esta actividad, llevada a cabo por los primeros americanos, podría ser el más remoto antecedente del desarrollo de la muy posterior religión maya. Si bien no tenemos datos precisos de cuáles son los orígenes de la civilización maya, sí sabemos que esta concede una gran importancia dentro de su cosmovisión y cosmogonía a las cuevas como sitios centrales de la creación, entre otras cosas. Para los mayas antiguos, los primeros hombres habrían surgido de una cueva, lo cual podría tener un origen muy distante en el tiempo, precisamente en la interacción que tuvieron con estos sistemas los antiguos pobladores de la península. Esta afirmación no es irracional cuando pensamos en el desarrollo de la ritualidad en Europa a través de las cuevas paleolíticas.

Muy probablemente y como diversos autores lo documentan, el inicio de la ritualidad en Europa se dio en las cuevas, donde se practicaba lo que algunos autores han denominado *las religiones de la prehistoria* (Campbell, 1987; Clottes y Lewis-Williams, 2010; Eliade, 1978; Fagan, 2011; Jaubert *et al.*, 2016; Lewis-Williams, 2002; Wunn, 2005). La más notable evidencia material de lo anterior son, sin duda, las magníficas muestras de arte rupestre de Lascoix, Chauvet o Altamira, por citar sólo tres, y en donde además del legado artístico universal que nos heredaron los pobladores paleolíticos de estas zonas del antiguo continente, pueden observarse altares que incluyen ofrendas muy tempranas. Son sorprendentes por ejemplo, aquellas que incluyen cráneos de osos cavernarios. Otro caso extraordinario, no sólo por su forma y probable función, sino por su antigüedad, son las estructuras neandertales de la Cueva de Bruniquel en Francia, cuya época se remonta a 176500 años, sin duda, las estructuras más antiguas hechas por el hombre (Jaubert *et al.*, 2016).

En el caso de las cuevas de la península de Yucatán, éstas pudieron también haber sido la cuna de la ritualidad de los primeros pobladores de la zona, misma que trascendería de alguna manera para sentar las bases de la ritualidad de los antiguos mayas. Habrá que recordar que

los grandes sistemas de cuevas inundadas que conocemos actualmente, eran cuevas secas o semi-secas, que si bien ya contenían agua, ésta debe haberse encontrado mucho más abajo de lo que se encuentra en la actualidad y humanos y animales podían transitar a través de ellas. Durante las grandes sequías que precedieron al deshielo a finales del Pleistoceno, el agua debió alejarse aún más, haciendo cada vez más difícil el acceso al preciado líquido, causando, con esto, algunas fatalidades que para nosotros se han manifestado en la forma de contextos arqueológicos. Para los antiguos pobladores peninsulares, la falta de agua superficial y el hecho de que las fuentes de agua disponibles se alejaran debieron haber causado un efecto dramático, pero también, en cierta forma, pudo haberse revelado como una epifanía o un evento incluso mágico. Lo que es claro es que la obtención de agua debe haberse vuelto cada vez más difícil. La gran oportunidad de comprobar estos aspectos hasta hace poco tiempo desconocidos para la ciencia se dio entre otros en un caso excepcional. Me refiero al cenote Hoyo Negro (Chatters *et al.*, 2015; Hodge, 2014), contexto acerca del cual mantuve la hipótesis, desde el inicio de las exploraciones en el sitio, de que se trataba de un claro ejemplo de la dificultad para obtener agua a finales del Pleistoceno (Montelongo, 2011). La ausencia de fuentes de agua accesibles, podría explicar que enormes elefantes antiguos se adentraran en espacios oscuros y ajenos para ellos y que fauna de menor tamaño y humanos siguieran sus pasos. La evidencia arqueológica parece estar manifestando un esfuerzo especial de supervivencia.

Por otro lado, los sistemas de cuevas inundadas de la península de Yucatán han brindado oportunidades únicas a la ciencia para documentar especies que no se sabía que hubieran existido en la zona. Tal es el caso de los primeros osos pleistocénicos registrados en el estado de Yucatán: en un solo cenote fueron encontrados cuando menos cinco individuos, dos adultos y tres subadultos, probablemente pertenecientes a la especie *Arctotherium* (**Figura 2**). En el sitio se documenta la existencia de restos humanos, aunque habría que comprobar si están asociados temporalmente a los cráneos de los osos (De Anda, 2012).

El caso de estos grandes sistemas de cuevas es único en el mundo debido a que, gracias a que los sitios se inundaron y a que así han permanecido desde entonces, se propiciaron condiciones ambientales muy estables dentro de ellas y es por esto que los materiales de más de 10000 años de antigüedad se encuentran en un estado de preservación sobresaliente. El Proyecto Gran Acuífero Maya, el cual dirijo desde 2015, continúa estudiando con detenimiento estos lugares y podemos decir que estamos ya ante algunas evidencias que podrían sustentar nuestra afirmación acerca del temprano desarrollo de la ritualidad dentro de las cuevas. Esperamos muy pronto dar a conocer los primeros resultados de estas investigaciones.



Figura 2. *Cráneo de un oso adulto, probablemente de la especie *Arctotherium* que yace junto con otros cuatro individuos, a una profundidad de 30 metros, en un cenote de Yucatán. Foto: Guillermo Pruneda/ Archivo Proyecto GAM.*

La cultura maya y las cuevas

Sabemos que gran parte de la cosmovisión de las civilizaciones precolombinas en Mesoamérica, en particular la de la civilización maya, se fundamenta en la percepción de una serie de rasgos naturales como las montañas, las cuevas, los ríos y el mar, entre otros, y que conformaban una geografía sagrada a través de la que los hombres trataban de entender su universo y buscaban la protección de fuerzas sobrenaturales. Sin duda, el elemento más importante que nos ocupa en este trabajo son las cuevas. Estas manifestaciones naturales se percibían como obra de los dioses que habitaban en ellas y que decretaban, a través de estos lugares sagrados, el diario devenir de los hombres. Era tal la importancia de estos lugares que se tenía la creencia de que el hombre mismo y los primeros alimentos habrían surgido del interior de una cueva. Estos rasgos, además, eran los grandes contenedores de lo más sacro, como el agua, y ésta, junto con los otros dones de los dioses, se recreaban y multiplicaban en un ciclo interminable que había iniciado cuando todo lo que existe fue creado. En particular, las montañas y las cuevas eran percibidos como los repositorios de las esencias que dieron sustento a la creación del cosmos. La continuidad y buen funcionamiento del universo y, por ende, el sostenimiento de la vida dependía en gran medida de que se llevara a cabo una buena relación entre los hombres y los dioses, misma que se traduciría en un proceso de intercambio de dones y bienes. Lo anterior, se manifestaba particularmente en una especie de "contrato", que incluía rituales específicos entre los hombres y ofrendas de ídoles muy diversas (López Austin, 2006).

Como he mencionado líneas arriba, en el caso de las Tierras Bajas del Norte, como es definida arqueológicamente la península de Yucatán, el rasgo más destacado en la geografía sagrada de los antiguos mayas eran, sin lugar a dudas, las cuevas y cenotes, como lo demuestran las diferentes manifestaciones documentadas, no solamente dentro de las oquedades, sino incluso en la arquitectura de la superficie, los códices y los patrones de asentamiento. Existe una cercana, pero poco entendida conexión entre los mayas y el lado oscuro de su universo, al cual accedían a través de las oquedades naturales. Para aproximarnos a estos sistemas, desde el punto de vista arqueológico, en nuestro proyecto de investigación hemos privilegiado lo que llamamos una *visión maya*, ya que percibimos los cenotes como un tipo más de cueva, en este caso inundada tal como lo hacían, y lo hacen aún, los mayas modernos y en su lengua lo llaman *Ch'een*. Esto se ve claramente reflejado en el muy conocido sitio llamado *Chi Ch'een Itzá*, por ejemplo. Cueva y cenote, entonces, eran percibidos como elementos de igual carga simbólica y los mayas establecían a ambos como portales que dividían el mundo físico del sobrenatural. Lo más probable es que la gran sacralidad que emana de las oquedades naturales fuera originada por su estrecha relación con el agua. En el caso de los cenotes ésta era una relación obvia y en el de las cuevas secas, si bien la presencia de este elemento era algunas veces más sutil, la combinación con la obscuridad eterna, el goteo persistente del líquido vital, la exuberante decoración natural de las formas calcáreas e incluso los olores y sonidos que producían las cuevas, exacerbaban los sentidos y daban con esto una connotación especial, diferente a la cotidianidad apartada del mundo en el que el hombre se desenvolvía. En suma, un ambiente hierático que tuvo que ver de manera determinante en la forma como los mayas percibían su universo.

Aún en nuestros días, los mayas modernos en sus rezos de las ceremonias de petición de lluvia, así como de rituales de desagravio, invocan por su nombre a todos los cenotes que se encuentran alrededor del área donde se lleva a cabo el ritual, porque cada uno de ellos tiene un dueño sobrenatural, un ente divino (**Figura 3**). El pasar por alto alguno de estos cenotes es un insulto a esa deidad y eso puede tener represalias. El culto a los cenotes sigue vigente en algunas áreas en nuestros días y tiene un origen tan remoto como la civilización maya misma. En nuestra investigación de docenas de cenotes, la evidencia de su sacralidad se materializa en ofrendas de toda índole.

Las cuevas secas e inundadas son uno de los más importantes centros de la ritualidad maya, pero no cualquiera ni en cualquier momento podía tener acceso a estos espacios. La relación del hombre con las cuevas, especialmente el acceso a ellas, se daba a través de momentos y espacios específicos, a los cuales se accedía a través de la actividad ritual. Estos espacios eran umbrales que marcaban la frontera entre el mundo físico, conocido, aprehensible, y aquel que tendría que ver con lo



Figura 3. A lo largo de los siglos se han llevado a cabo ceremonias de petición y desagravio alrededor de los cenotes, durante las cuales, los mayas modernos imploran a las deidades y "espíritus" que habitan las cuevas. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.

sobrenatural. Esta división se define, de acuerdo con López Austin, como una doble naturaleza del tiempo y el espacio. En este sentido, la realidad divina podía traslaparse al espacio de los mortales.

López Austin anota:

Por una parte, existía el tiempo-espacio original y ajeno ("anecúmeno"), poblado por seres "sobrenaturales": los dioses, las fuerzas, los muertos; por la otra, estaba el tiempo-espacio causado, propio ("ecúmeno"), el mundo creado por los dioses y habitado por las criaturas: los hombres, los animales, las plantas, los minerales, los meteoros, los astros. (López Austin y Millones, 2008).

Resulta inevitable notar también la relación entre las cuevas y los aspectos que tienen que ver con la fecundidad, tanto de los seres humanos como la de los alimentos. Así, observamos coincidencias entre las culturas mesoamericanas vinculadas muchas veces con la manera en la cual la divinidad otorgó a los hombres algunos de los bienes más preciados; por ejemplo, en el caso de los mayas, el primer grano de maíz, que provenía desde el lugar donde todo fue creado y que se encontraba dentro de una cueva (Bassie-Sweet, 1991; Heyden, 1976, 1998; López Austin y Millones, 2008). Otra constante manifiesta en las representaciones míticas de los lugares sagrados es aquella que habla de las cavernas como el lugar de nacimiento de los dioses creadores del hombre, del universo y de las nubes.

Las cavernas representaban, muy probablemente también, la más importante zona de transición entre la región segura, en la que los hombres se desenvolvían, es decir, el mundo físico con esa zona vedada que pertenecía al mundo sobrenatural, en donde reinaba lo divino y a la cual podría accederse sólo a través de circunstancias especiales que propiciarían el desprendimiento de la llamada "materia ligera" de las criaturas (López Austin y Millones, 2008). Este desprendimiento podría darse por accidente, por extrema audacia, por mandato de los dioses o

dividiendo la integridad corpórea de las criaturas (López Austin y Millones, 2008). El desprendimiento de la materia podría suceder en casos específicos, tales como el ritual, de manera onírica o después de la muerte (López Austin, 2004; De la Garza, 2019). No es casual entonces que las cuevas y cenotes hayan sido escenario de tan diversas manifestaciones rituales en la península de Yucatán.

Si bien estos sitios tuvieron una importante connotación ritual, cabe decir que fueron también aprovechados por los antiguos mayas como proveedores de agua y de elementos utilizados en rituales especiales, entre los que podemos contar estalactitas, estalagmitas y la preciada *suhuy ha* o agua virgen que debía obtenerse en una zona de la cueva no tocada, la cual era utilizada de manera exclusiva para ceremonias, entre las que destaca, por ejemplo, la llamada *ch'a'ch'áac* para petición de lluvias. Es importante hacer notar que una función no excluye a la otra, me refiero al hecho de que, si bien algunos cenotes fueron usados como proveedores de agua, esta función práctica no inhabilitaba su aspecto ritual como lugares sumamente sagrados. Un claro ejemplo es lo manifestado líneas arriba acerca de las ceremonias de los mayas modernos.

La función de las cuevas y cenotes como sitios sacros ha sido señalada reiteradamente en este escrito coincidentemente con diversos autores, (Bassie-Sweet, 1991; Brady, 1991; Brady *et al.*, 1997; Brady y Prufer, 2005; Brady y Veni, 1992; Brady, 1996; López Austin, 2004; McLeod y Puleston, 1979; Rissolo, 2001; Stone, 1995; Vogt, 1969; Vogt y Stuart, 2005).

Esta relación parece originar la idea de que no sólo los dones que hemos mencionado ya, sino el eje del mundo mismo, el *axis mundi* surge del fondo de una cueva que se arraiga en la parte más profunda del universo, el corazón mismo de la tierra. Es precisamente en torno a este eje que los mayas antiguos articulaban su existencia y se ubicaban en el cosmos.

Las cuevas y el *axis mundi*

El libro del Chilam Balam de Maní (Barrera-Vásquez y Rendón, 1988) narra, entre otras cosas, cómo en el inicio del mundo surgieron grandes ceibas en cada una de las esquinas del universo, mismas que representan también los cuatro rumbos del mundo: una ceiba roja surgió al oriente; una blanca, al norte; una amarilla, al sur y, finalmente, una ceiba negra surgió al poniente. La ceiba central que corresponde al eje cósmico fue la ceiba azul-verde.

Este eje cósmico o *axis mundi* en la forma de una gran ceiba y sus proyecciones hacia los extremos del mundo se manifiestan también en la forma de umbrales que pueden funcionar en direcciones opuestas, ya que a través de ellos pueden transitar, por ejemplo, las almas de los muertos o servir de punto de salida de entes sobrenaturales. Una

derivación de la tradición oral de estos ingresos de los seres sobrenaturales al mundo de los mortales se manifiesta en mitos que siguen vigentes en nuestros días, tales como la temible *Xtabay*, una bella mujer-serpiente que asciende a través del tronco de una ceiba enraizada en la región del inframundo (Barrera-Vázquez, 1981).

La mención de una gran Ceiba Sagrada es recurrente en la tradición oral yucateca. Ya en épocas tempranas de la investigación arqueológica del área maya, Eric Thompson (1991) menciona la antigua creencia maya de que los ancestros vinieron a través de las raíces de una ceiba ubicada en el interior de una cueva.

En el dato arqueológico existen referencias a la importancia ritual de este árbol cósmico y su vínculo con las cuevas. Ejemplo de esto es el de la exploración de Willys Andrews en la cueva de Balankanché a finales de los años cincuenta. Durante las fases iniciales de dicha exploración, una enorme columna natural fue relacionada con la representación de una Ceiba Sagrada (Andrews, 1970; MacLeod & Puleston, 1978). Alrededor de esta formación calcárea se encontró una gran cantidad de ofrendas muy probablemente relacionadas con el dios de la lluvia. En esa misma época y durante la realización de una ceremonia dentro de la cueva, Romualdo Hoil el *h'men* (sacerdote o curandero en maya) que dirigió el ritual, identificó este rasgo como una ceiba. El centro de la ritualidad de la cueva de Balankanché parece, entonces, estar dado por la presencia de esta Ceiba Sagrada situada en una zona alejada de la superficie, a cuya "sombra" se depositaron una gran cantidad de ofrendas (**Figura 4**).



Figura 4. Ofrenda maya milenaria en la Cueva Balankanché, en Chichén Itzá. Representación del árbol cósmico, la ceiba sagrada. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.

La relación entre el lado oscuro del universo, el corazón de la tierra y el árbol cósmico es muy plausible en Balankanché, ya que el salón donde se encuentra la columna es el centro de sacralidad de la cueva, además de que esta columna-ceiba delimita el paso entre la cueva seca y un cuerpo de agua. Tal parece que éste era considerado el último umbral dentro de la cueva y representa, de hecho, su zona más sagrada.

Los cenotes, mitos y realidades en torno a los sacrificios y el depósito de los muertos

Podemos puntualizar en este apartado que los antiguos mayas desarrollaron una compleja religión, abundante en dioses y entidades sobrenaturales, cuyas acciones influían de forma irremisible en la naturaleza y los seres humanos. La vida del hombre mesoamericano, en general, se encontraba totalmente imbuida en el servicio a los dioses, (López Austin los llama *Homo religiosus*), ya que estos dependían del sustento proporcionado por los mortales, quienes a cambio recibirían la intersección divina, continuando así con un ciclo de "trueque" y garantizando de esta forma la continuidad y el buen funcionamiento del universo (Nájera, 2003; López Austin, 1998).

Dentro de estas manifestaciones e intercambio de favores entre hombres y dioses, la ofrenda de sangre, especialmente la relacionada con el sacrificio humano, cobró especial importancia (Nájera, 2003). Las culturas mesoamericanas practicaron el sacrificio humano desde tiempos muy tempranos y los mayas no fueron la excepción. Para la época en la que los españoles llegaron a Yucatán y registraron la práctica del sacrificio humano en el siglo XVI, los mayas habían estado realizando esta actividad por más de mil años (Nájera, 2003, Saturno *et al.*, 2005, Stuart, 2003). Las ofrendas de sangre humana eran una práctica necesaria para asegurar, entre otras cosas, el balance del universo, la legitimación de la autoridad de alguna dinastía, asegurar la salud de la población y muy especialmente garantizar la lluvia para la agricultura.

Es claro que la evidencia material del depósito de seres humanos o partes de ellos, encontrada en cuevas y cenotes, es una importante manifestación de la religiosidad maya, aunque a través de los años esta práctica ha sido confundida con alguna especie de sangría despiadada llevada a cabo por los antiguos mayas contra su propia gente. A los ojos de los conquistadores y sobre todo de algunos religiosos que posteriormente escribieron crónicas que se han vuelto fundamentales para entender el pasado prehispánico, la práctica del sacrificio humano era una costumbre brutal y diabólica. Por ejemplo, el célebre obispo de Yucatán, Fray Diego de Landa, describió la práctica de realizar ofrendas humanas al Cenote Sagrado y particulariza en el hecho de que son mujeres jóvenes las víctimas predilectas para la realización de los sacrificios (Landa, 1982). Esta idea permaneció no sólo en el imaginario popular, sino en el ámbito académico por muchos años. Era una verdad

“oficial” el hecho de que en el Cenote Sagrado de Chichén Itzá (**Figura 5**), hermosas jóvenes ricamente ataviadas eran ofrendadas a los dioses. Con esta creencia y los relatos de Landa, hace algunos años, me di a la tarea de analizar los huesos provenientes del también llamado Cenote de los Sacrificios (De Anda, 2008); así pude documentar entonces que los restos no pertenecían a mujeres jóvenes, ya que la mayoría de las víctimas eran niños. Un abrumador 80% de los restos provenientes del Cenote Sagrado pertenece a infantes de entre 3 y 11 años de edad, algunos de los cuales presentan huellas de manipulación del cuerpo alrededor del momento de la muerte, tales como desarticulación, desollamiento y exposición al fuego (De Anda, 2012). En el caso de los adultos, el análisis de la muestra indica que éstos fueron en su mayoría (69%) hombres entre las edades de 20 y 30 años. Otro dato interesante, probablemente uno de los más relevantes, exhibe que también eran depositados en este cuerpo de agua restos óseos de individuos que habían sido exhumados y vueltos a depositar, probablemente ancestros importantes que recibían los honores de un segundo funeral en la entrada misma al corazón de la tierra, o bien, restos de una persona a la cual pudieran atribuirse malas rachas, tales como sequías, enfermedades o algún otro mal, por lo que se haría necesaria su exhumación y posterior depósito acuático. Por otro lado y de acuerdo con De la Garza (en prensa, 2019), los muertos, lejos de desvanecerse al llegar a su destino final, viven en el inframundo y los antiguos mayas podrían llevar a cabo ciertos ritos, en los que se les invoca para acompañar a sus descendientes o volver a encarnar en un cuerpo humano. La pregunta es

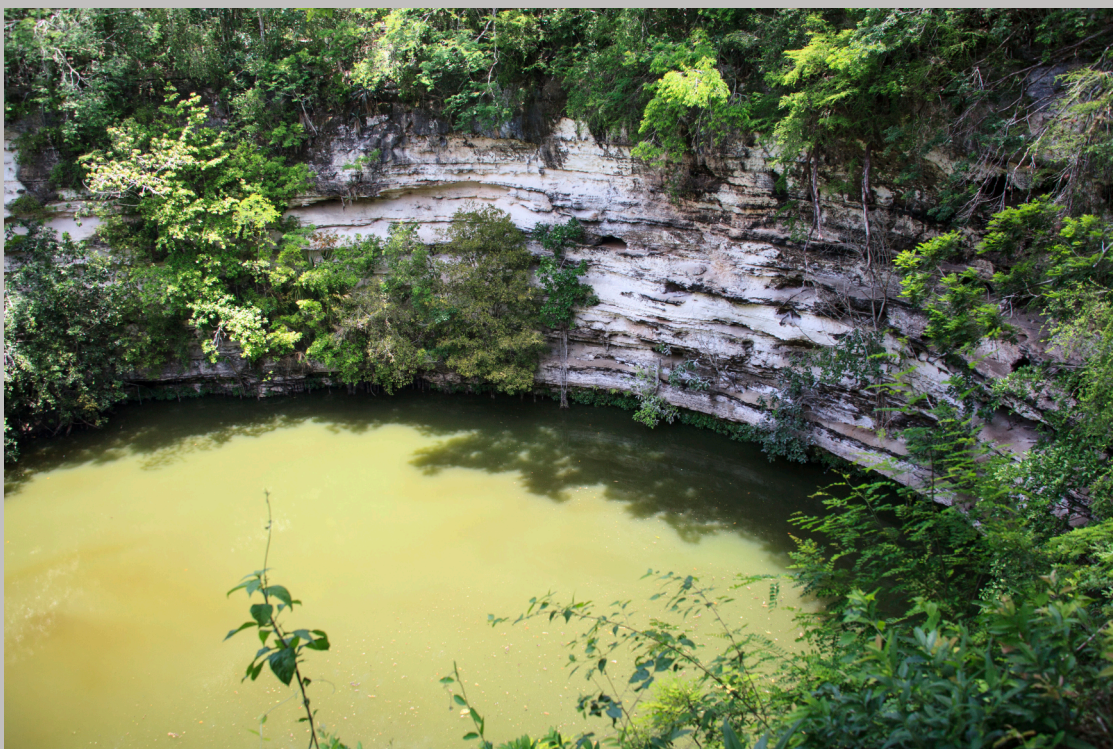


Figura 5. Cenote Sagrado, Chichén Itzá, Yucatán. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.

entonces, si estos huesos exhumados podrían haber pertenecido a alguna de estas categorías rituales. No se excluye, desde luego, el depósito de cuerpos completos, ya que el análisis me permitió registrar huesos sin huellas de manipulación alguna, lo cual es congruente con la práctica de arrojar víctimas aún con vida dentro del cenote, o bien, al hecho de realizar inhumaciones de individuos que no necesariamente murieron por causa de algún sacrificio.

En este sentido, las investigaciones en torno al culto de depositar a los muertos en los cenotes continúan de manera intensiva, aunque es una labor muy compleja. A la luz de esta información, la idea de que los cenotes fueron exclusivamente sitios de "sacrificio ritual" puede estar muy alejada de la realidad, ya que como el estudio del Cenote Sagrado nos demuestra, los depósitos de seres humanos pueden haber pertenecido a partes de cuerpos aún con músculo adherido a ellos, cuerpos completos, cuerpos calcinados y entierros secundarios, (depósito de huesos exhumados de individuos enterrados en superficie por algún período de tiempo), entre otros (**Figura 6**).

Los depósitos de seres humanos o sus restos, ricas ofrendas de jade, textiles, tumbaga, oro, cerámica, turquesa, entre otros muchos elementos, caracterizan la compleja actividad ritual que se llevó a cabo en el principal cenote de Chichén Itzá. De esta manera, el también conocido como *Pozo de los Itzaes* nos sirve como parámetro para inferir que en muchos de los cenotes de la península pudieran haberse llevado a cabo ritos con diferentes niveles de complejidad. El problema de la identificación es que en los contextos cavernarios, tales como las cuevas y cenotes, algunas veces, los elementos tienden a hundirse en los sedimentos del fondo, lo cual dificulta la identificación de los procesos que pudieran servirnos como diagnóstico para determinar una u otra forma de depósito ritual.



Figura 6. *Cráneo de un infante de aproximadamente 9 años, presenta deformación craneal. Fue extraído del Cenote Sagrado en 1967. Foto: Guillermo de Anda/Archivo Proyecto GAM.*

Cuevas, mitos, tradición oral y calzadas subterráneas

Las calzadas extraordinariamente lineales construidas por los antiguos mayas, conocidas como *sakbeh'ob* o "caminos blancos" en maya, son rasgos comunes en gran parte del área maya. Van desde pequeñas calzadas de sólo unos metros de extensión, hasta el imponente camino de casi 100 kilómetros entre Cobá y Yaxuná. La presencia de esta intrincada red de caminos ha sido interpretada como parte de una compleja red comercial, sociopolítica y, desde luego, desde el punto de vista religioso y ritual.

Mucha es la literatura que existe con relación a los *sakbeh'ob* y su interacción con las diversas esferas desde las cuales puede ser abordado el estudio de estas importantes obras de ingeniería maya antigua. Sin embargo, en este trabajo quiero referirme particularmente a la relación que tuvieron los *sakbeh'ob* con el ámbito religioso. Existe, hasta nuestros días, una serie de creencias relacionadas con las grandes calzadas construidas en un tiempo mítico y que son de naturaleza intangible. Actualmente, es común escuchar a los pobladores de algunas comunidades contar historias acerca de fantásticos caminos que unen por debajo de la tierra centros poblacionales con otros pueblos, ciudades, iglesias, cenotes y otros rasgos importantes. Durante nuestras exploraciones, muy frecuentemente escuchamos fascinados estos relatos. Se habla algunas veces de conexiones fantásticas entre una cueva y otra, e incluso de caminos que se encuentran debajo del agua. En este sentido, y en relación con la naturaleza mítica de estos rasgos, Bolles y Folan (2001) destacan que cuando se habla de *sakbeh'ob*, debe tomarse en consideración la variación semántica de la palabra que puede referirse también a míticos caminos que delinear el contorno de rutas terrestres, celestes y subterráneas.

Encontramos muchos ejemplos de estos caminos en la tradición oral que aún transmiten los actuales habitantes de poblaciones de las Tierras Bajas del Norte y que son consistentes todas, con la idea de una red de calzadas que cruzan la península de Yucatán y que incluso traspasan sus límites, llegando a zonas tan remotas como el centro de México. De esta manera, el relato mítico y algunos elementos de la antigua religión maya que permean ancestralmente a través de la tradición oral, hasta los modernos pobladores de algunas regiones de Yucatán, se vuelven parte incluso, de una cotidianidad que toma como un hecho irrefutable la existencia de estos rasgos que habrían permanecido ocultos desde tiempos remotos. Algunos de estos míticos relatos hablan de un fabuloso camino subterráneo que une a las poblaciones de Cobá con el Cenote Sagrado en Chichén Itzá, constituyendo una larguísima calzada subterránea, que debería continuar vía Uxmal, hasta llegar a México-Tenochtitlán. Coincidentemente el final del camino es siempre un punto importante, la plaza, la iglesia de un pueblo o una ciudad.

Por otro lado y de acuerdo con William Folan (Bolles y Folan, 2001; Folan, 1980), la distribución espacial de la ciudad de Chichén Itzá fue construida tomando en cuenta elementos de una geografía mítica, basada en algunos fragmentos del Popol Vuh (Recinos, 1996). En esta afirmación, llama especialmente la atención la mención de un legendario pasaje entre el Cenote Sagrado y el Cenote Xtoloc. Dicho túnel pasaría debajo del Templo de Kukulcán y sería en este punto en el que se recrearía el mito del pasaje de Hunahpu e Ixbalanque en tránsito al Xibalbá, ya que en este lugar, los legendarios gemelos darían un giro hacia el camino negro, es decir, hacia el oeste, para encontrarse de esta manera con el Gran Juego de Pelota, debajo del cual se especula que existiría otra caverna. Si bien pensamos que las ideas pioneras de estos autores han sido rebasadas, consideramos que su trabajo, que involucra el estudio de la tradición oral, sienta las bases para pensar en la idea de un patrón de asentamiento basado en la geografía sagrada. En este sentido, llama la atención un descubrimiento hecho apenas hace unos años por el investigador René Chávez y su equipo del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se trata de la posible existencia de un gran cenote sobre el cual pudo haber sido construida la Pirámide de Kukulcán, conocida también como *El Castillo*. El supuesto de la existencia de este rasgo fue hecho con equipo de electro resistividad, lo que falta es poder encontrar un acceso a este sitio. El mismo Chávez describe un posible túnel o pasaje en la fachada noroeste que podría ser la entrada a este sitio la cual pudiera llevarnos al acceso de dicho cenote, cubierto actualmente por miles de toneladas de piedra.

Nuestro equipo ha explorado, sin éxito hasta el momento, los cenotes Sagrado e Xtoloc en busca de este pasaje y nuestras exploraciones continúan a la fecha. Es necesario, sin embargo, y a la luz de las nuevas investigaciones que se realizan actualmente en el sitio de Chichén Itzá, llevar a cabo comprobaciones en este sentido. No obstante, un dato concreto es que la distribución espacial del sitio parece estar muy influenciada por sus rasgos sagrados más importantes, las cuevas y cenotes. No debemos ir muy lejos para comprobar la validez de la afirmación anterior, ya que hay un rasgo que demuestra plenamente este hecho desde hace ya varias décadas, desde las primeras exploraciones del sitio en los años treinta y que dieron lugar al primer mapa arqueológico de la gran ciudad a través del Instituto Carnegie de Washington. En este plano, destaca de manera especial la gran calzada que une como un cordón umbilical el Cenote Sagrado y el Templo de Kukulcán, sin duda la edificación más importante de la última etapa constructiva del sitio. Pareciera que esta alineación formara parte de un cosmograma que modela al asentamiento en su última etapa constructiva. Más adelante profundizaremos un poco más en este aspecto.

Una calzada excepcional: el *sakbeh* de la cueva Xbis

Si bien la existencia de fabulosos y larguísimos caminos que cruzan por debajo de la tierra es vigente en una serie de mitos que han sido rescatados por la tradición oral durante siglos, es poco probable que éstos sean reales. Recordemos, sin embargo, que los mitos tienen su origen en eventos con una carga importante de verdad. Durante el desarrollo de nuestro proyecto de investigación *El Culto al Cenote*, exploramos una cueva en la temporada de campo del año 2008. Nos guió a ésta y a muchos otros sitios explorados, el seguimiento de algunas fuentes históricas, entre las que sobresale la recopilación realizada por France Scholes y Eleonor Adams, publicada en 1938. El estudio y análisis de estas fuentes nos han servido como antecedente para la búsqueda de cuevas y cenotes que pudieran contener manifestaciones materiales de actividad ritual, especialmente relacionada con la actividad del sacrificio humano (De Anda *et al.*, 2004). Una de nuestras hipótesis de trabajo era que, de acuerdo con el seguimiento de los datos contenidos en fuentes históricas, podríamos ser capaces de rastrear manifestaciones rituales del culto a cuevas y cenotes, que pudieran corresponder a épocas mucho más remotas, que habrían perdurado en el tiempo hasta la época de la Colonia. Nos basamos para esto en el modelo que plantea López Austin (1998) en el sentido de que: “El ritual es una práctica fuertemente pautada que sigue una serie de pasos previamente establecidos para garantizar su eficacia”. Debido entonces a la fuerte persistencia del ritual a través del tiempo y las estrictas pautas alrededor del cual se organizaba, la manifestación ritual que mencionamos aquí podría tener un origen muy remoto que debería haber perdurado hasta bien entrada la Colonia.

La población de Hochtún fue un sitio arqueológico reportado en el *Atlas Arqueológico de Yucatán* (Garza y Kurjack, 1980) como un sitio de rango medio. Hoy en día existen sólo unos cuantos remanentes de lo que fue el sitio prehispánico, en la forma de pequeños basamentos, en la mayoría de los cuales se han construido habitaciones modernas. Cerca del poblado y dentro de una cueva de aproximadamente 250 m de extensión, fue localizado un *sakbeh*. La entrada a la cueva es difícil, ya que es necesario caminar agachado, casi a gatas, por un tramo de más de 50 m. La calzada a la que me refiero empieza a ser perceptible aproximadamente a 80 m de la entrada de la cueva y continúa por cerca de 100 m hasta llegar al agua de un cenote. Este rasgo llamó nuestra atención porque presenta muy buen estado de conservación en un tramo de cuando menos 77 m y exhibe la misma técnica de construcción que las calzadas en sitios de superficie, particularmente las observadas en el sitio de Chichén Itzá.

Esta calzada en promedio presenta un ancho de 1.5 m y en algunos puntos tiene una altura de hasta 40 cm. Otro interesante detalle es que muy cerca del inicio del *sakbeh*, puede observarse un basamento de lo

que parecen ser los restos de un antiguo altar. En algunos sectores a lo largo del camino blanco puede observarse un número importante de fragmentos de cerámica cuyo análisis inicial, basado únicamente en la observación tipológica llevada a cabo por la investigadora Socorro Jiménez de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY), arroja una cronología correspondiente con el Clásico Temprano (200-600 P.A.). Otro rasgo muy sugestivo es el hecho de que en algunos de los sectores del *sakbeh*, puede observarse la formación de algunas estalagmitas, lo cual podría ser útil también para fechar la antigüedad del camino. Las orillas de la calzada se encuentran erosionadas en algunas zonas, por lo que es posible observar la técnica constructiva que, como he mencionado, es muy similar a la usada en la superficie de las grandes ciudades prehispánicas.

Otra observación interesante es la utilización de grandes trozos de espeleotemas en la cimentación del camino. Es claro que la intención de los constructores de este *sakbeh* era hacerlo llegar al agua del cenote; sin embargo, si la única intención hubiera sido ésta, la calzada pudo haber seguido una forma totalmente recta hacia el noroeste, pero no es así (**Figura 7**). El camino modifica su rumbo aparentemente en relación con la presencia de una columna natural semejante a la reportada en la cueva de Balankanché, de la cual hablamos previamente en este trabajo. En esta cueva y a lo largo del *sakbeh*, han podido observarse dos grandes columnas que pudieran tener relación con el concepto de la Ceiba Sagrada. El camino de la cueva Xbis gira hacia el oeste, exactamente en el punto donde se encuentra con la segunda columna-ceiba, dando la impresión, incluso, de que la columna está siendo rodeada por el *sakbeh*. El camino termina un poco más adelante de donde se observa este giro, pero al llegar al final, es continuado en el agua más profunda (1 m aproximadamente, que puede variar entre la temporada seca y la de lluvias) por tres enormes plataformas de piedra, careadas y dispuestas en la forma de escalones para acceder al agua profunda. La última de estas plataformas se encuentra exactamente frente a la entrada de una cueva inundada y profusamente decorada por espeleotemas, la cual tiene una profundidad promedio de 10 m y continúa de manera horizontal por aproximadamente 60 m más hasta acceder a una nueva cueva seca.

Una vez en este sector de la cueva, es posible caminar por aproximadamente 40 m hasta encontrarse con un nuevo cenote que desemboca en una tercera cueva seca. Cabe hacer mención en este punto, que el nivel del agua en la cueva durante el periodo Clásico Terminal (siglo X) pudo haber sido diferente, como algunos otros estudios en cuevas de la península parecen indicar, tal como es el caso del Cenote Holtún, del que hablaré más adelante, por lo que es posible que en algún punto de la historia de la caverna, las tres cámaras referidas pudieran haber sido accesibles a nado. El *sakbeh* de la cueva

Xbis sobresale, entre otras cosas, por el enorme esfuerzo de trabajo que debió haber sido dedicado a su construcción. Este sitio, al igual que algunos rasgos de la disposición espacial de algunos sitios de superficie, (Chichén Itzá, por ejemplo) parece estar manifestando una intención de evocar algunos de los antiguos mitos de la cosmovisión maya, en particular aquellos que tienen que ver con una ruta al inframundo.

Figura 7. En la Cueva Xbis, en Yucatón, se encuentra un sakbeh (camino blanco), el cual conduce al agua. Foto: Paul Nicklen/Archivo Proyecto GAM.



Chichén Itzá y el cosmograma

El centro de la antigua ciudad de Chichén Itzá podría representar un enorme cosmograma, lo cual le da una relevancia especial. Se ha atribuido esta forma en el patrón de asentamiento a algunas otras ciudades mesoamericanas, ejemplo de esto son Teotihuacán, Dos Pilas, Templo Mayor, entre muchas otras. Por cosmograma nos referimos a la forma cuadrada o rectangular que era la representación en la que los antiguos mesoamericanos concebían el cosmos, que estaría formada por cuatro esquinas, en las cuales crecían cuatro ceibas sagradas, que hemos mencionado líneas arriba, es decir, los cuatro rumbos del universo maya, que en la actualidad conocemos como norte, sur, este y oeste. Chichén Itzá, en el patrón de asentamiento de su última etapa constructiva, parece representar este patrón. El arquitecto Ignacio Marquina documentó que la pirámide principal del sitio, El Castillo, está perfectamente alineada entre dos cenotes: el Sagrado al norte y el Xtoloc al sur (Marquina, 1958).

El marco conceptual del interés de nuestro proyecto El Gran Acuífero Maya en Chichén Itzá surgió del trabajo en el cenote Holtún, situado a 2.6 km al oeste de la Plaza Central del sitio, que muestra que una línea trazada desde Holtún al oeste, hacia el cenote Xkanjuyum al este, también pasa por el centro de El Castillo, formando un cosmograma

perfecto (**Figura 8**), con El Castillo al centro, flanqueado por cuatro cenotes (Anda *et al.*, 2016). El cosmograma se dibujó de manera más contundente cuando René Chávez y su equipo, a través de estudios de electro resistividad sugirió la existencia de un cenote debajo de El Castillo. Esto representaría la quinta dirección del universo maya y, de confirmarse su existencia, cambiaría profundamente nuestra percepción del sitio. Por una parte, sería claro que el nombre del sitio no se refiere al Cenote Sagrado, sino al cenote que está en la quinta posición, el *axis mundi* del sitio. Ese cenote debe haber sido el foco de la realización de ofrendas hasta que su acceso fue cerrado en un ritual de terminación, al construir una pirámide sobre su entrada. De existir este cenote, las ofrendas ahí colocadas podrían proveer la fechas más tempranas a la escasamente documentada cronología de Chichén Itzá. Este material podría, además, proporcionar información del cambio (si es que hubo alguno), entre los mayas más tempranos y el posterior control del sitio por los Itzaes. La posibilidad es particularmente sugestiva, ya que la oscuridad perpetua del cenote eliminaría el mayor problema para investigar el Cenote Sagrado, por ejemplo, que es la nula visibilidad causada por el crecimiento de algas. El problema es poder acceder a este cenote. La verificación de la existencia del cenote debajo de El Castillo representa una alta prioridad. Nuestro intento de acceder a esta oquedad a través de túneles desde la cueva de El Osario en dirección a El Castillo no ha sido exitoso; sin embargo, continuamos trabajando en la resolución del problema.

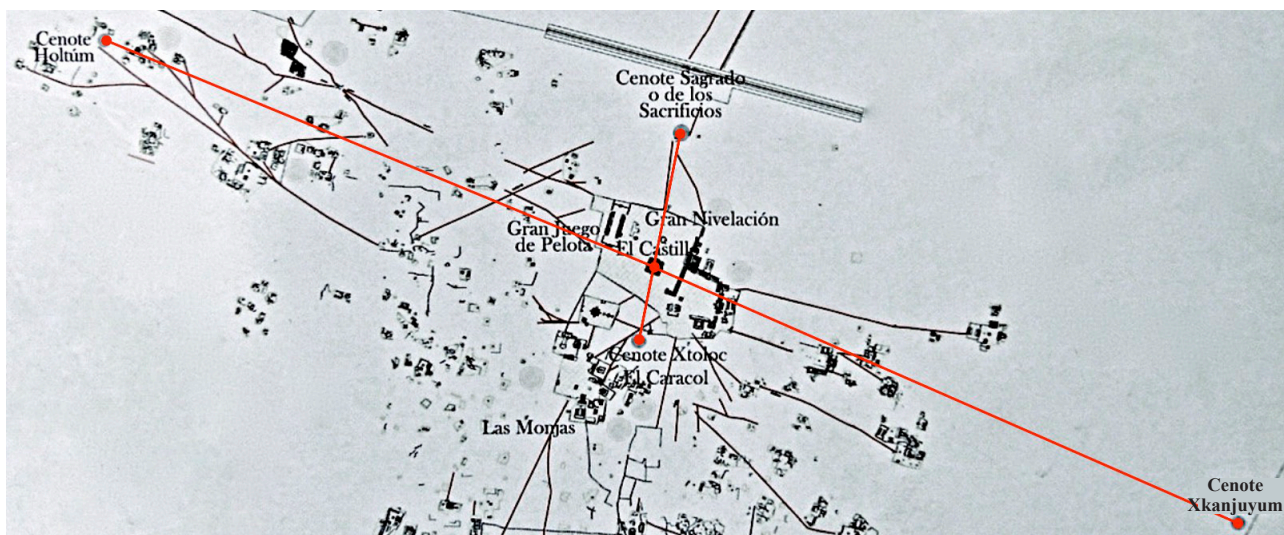


Figura 8. Mapa de Chichén Itzá en donde se muestra la alineación de cuatro cenotes con El Castillo. Imagen: Guillermo de Anda.

Parte de nuestros esfuerzos han sido directamente en el agua, tratando de utilizar técnicas de buceo. Durante la temporada de 2017, apoyados por nuestro experto en tecnología Corey Jaskolski, utilizamos escáneres de barrido lateral para hacer una prospección en las paredes sumergidas del Cenote Sagrado, buscando pasajes que nos conectaran con el cenote debajo de El Castillo. Si bien estamos en espera de algunos datos que están aun siendo procesados, podemos confirmar la existencia de una cueva que parte de la pared sur del Cenote Sagrado. Intentamos explorar la cueva buceando, pero avanzamos sólo unos cuantos metros al tacto, debido a la nula visibilidad de las aguas del cenote. Jaskolski utilizó, además de los escáneres, equipo LIDAR y radares de penetración para tratar de encontrar la entrada a este elusivo cenote (**Figura 9**), con excelentes resultados en imagen digital y modelos de 3D, pero aún sin éxito en hallar un acceso a la caverna inundada. Planeamos seguir con la prospección y rastreo de pasajes también desde el cenote Xtoloc, al sur de El Castillo, para verificar si éste conecta con el cenote central.

Figura 9. Corey Jaskolski, Guillermo de Anda y Dante García exploran el Cenote Sagrado de Chichén Itzá. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.



Esperamos que nuestra atención en el acuífero subterráneo nos permitirá reconceptualizar el sitio de Chichén Itzá y muchos otros en diversos aspectos. Los cenotes son los nódulos alrededor de los que se forman los asentamientos. Tradicionalmente, la discusión en Chichén Itzá ha girado alrededor de los cenotes Sagrado e Xtoloc, como si éstos fueran los únicos en el sitio. Nuestro proyecto ha documentado cuando menos 12 más en un radio de 6 kilómetros del centro del sitio. Los cenotes Holtún e Xkanjuyum son solamente dos de ellos. Yulá, un sitio arqueológico ubicado a unos 5 kilómetros al sureste de Chichén Itzá, por ejemplo, ha sido considerado un sitio separado, aunque no estamos de acuerdo con esa idea, y Balankanché ha sido tratado como simplemente una cueva, pero dado que llega al agua subterránea es

claramente un cenote. Al reintegrar Balankanché como parte de Chichén Itzá, ya que seguramente lo fue, en lugar de considerarlo una entidad separada, nuestro proyecto reconfigurará a Chichén Itzá como un sitio más grande y complejo.

La complejidad para comprender los patrones de asentamiento se extiende al reino del paisaje sagrado; por décadas, los arqueólogos trataron el Cenote Sagrado como un rasgo religioso, mientras que el cenote Xtoloc fue ignorado y considerado una fuente de agua doméstica. Una gran y bien elaborada estructura de cuando menos 15 m de altura adosada a la pared sur del cenote, documentada por nuestro proyecto (**Figura 10**) contradice por completo esa idea, lo mismo que dos cuevas artificiales de donde muy probablemente se obtenía *sascab* (tierra blanca en maya), una especie de cal que servía para la construcción de los grandes templos y la creación de estuco, en las paredes del cenote (**Figura 11**). No podemos tratar de entender las cuevas con el concepto occidental de sagrado contra profano, el cual ha sido impuesto al sitio de Chichén Itzá y a muchas cuevas y cenotes. Como he mencionado en este trabajo, para los mayas prehispánicos todos los cenotes eran sagrados y consideramos que con el modelo presentado para Chichén Itzá y otros ejemplos estudiados por nuestro proyecto hemos dado un paso importante hacia la confirmación de este concepto.



Figura 10. Una importante y muy elaborada estructura construida sobre una de las paredes del cenote Xtoloc atestigua la importancia que tuvo este cenote para los antiguos pobladores de Chichén Itzá. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.

Figura 11. De una de las paredes del cenote Xtoloc, los mayas antiguos extraían *sascab* para sus construcciones. Llama la atención la forma en la que modelaron esta cueva artificial para convertirla en un rasgo sagrado. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.



El cenote Holtún al oeste de El Castillo

He querido mencionar al final de este trabajo al cenote Holtún, ya que considero que resume muchas de las cualidades sacras manifiestas descritas a lo largo de este texto y, en ese sentido, me parece que puede tomarse como un "cenote patrón", ya que consideramos que en Holtún se llevó a cabo una serie de actos rituales muy variados y, además, estamos ante la posibilidad de que los antiguos mayas hayan también utilizado las cuevas y cenotes como observadores astronómicos. Esta cueva inundada se localiza a 2.6 km de distancia de la Plaza Central de Chichén Itzá y se liga a ésta a través del *sakbeh* 40. Esta calzada termina unos cuantos metros al sur del cenote, por lo que es clara la intención de unir este importante cuerpo de agua con la parte central de la ciudad a través de este camino. A diferencia de los otros grandes cenotes de Chichén Itzá, el Sagrado, Xtoloc y Xkanjuyum, el domo de la gran cámara que forma el cenote Holtún no ha colapsado, por lo que el acceso se hace a través de una pequeña abertura rectangular en el techo de 2.37 x 1.40 m (**Figura 12**). Esta entrada fue fuertemente modificada por los antiguos mayas para darle sus dimensiones perfectamente rectangulares. Hemos documentado, incluso, perforaciones en las paredes de la entrada y que deben haber funcionado como anclajes para cuerdas o escaleras.

Figura 12. La entrada del cenote Holtún fue cuidadosamente modificada. Los antiguos mayas se preocuparon por orientarla al noreste como la mayoría de las estructuras del sitio, para propiciar con esto entradas de luz relacionadas con fenómenos solares. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.



El cenote está en el centro de una gran plaza en una zona que fue densamente poblada durante el esplendor de Chichén Itzá. Holtún es importante, entre otras cosas, porque es el único cenote en Chichén Itzá, además del Sagrado, que ha sido investigado arqueológicamente. En consecuencia, nuestros resultados proveen la única perspectiva

desde la cual el Cenote Sagrado puede ser evaluado. Asimismo, los otros tres cenotes que forman las esquinas de Chichén Itzá son abiertos, por lo que el agua es afectada por los cambios de estación y tiende a desarrollar algas que afectan su visibilidad en mayor o menor grado. Los más afectados son los cenotes Sagrado e Xtoloc, en los que, bajo el agua, un buzo no puede ver su mano puesta en frente a su cara. Al contrario, el agua de Holtún permanece con una gran claridad durante casi todo el año y es gracias a esta extraordinaria visibilidad que hemos podido tener un vistazo para entender mejor la formación de estos contextos. El acceso del cenote Holtún, que se percibe desde la superficie, no hace justicia a las características morfológicas de esta magnífica caverna. El agua se encuentra 21 m por debajo de la superficie terrestre y el inicio del descenso se hace por la entrada rectangular que hemos descrito anteriormente, misma que da acceso a un bello techo con grandes estalactitas. Éste es un cenote profundo, ya que la zona de agua más somera se encuentra justo al centro, con una profundidad de 25 m que se incrementa en un efecto de campana hasta alcanzar un poco más de 40 m en las zonas más profundas. Algunos de los materiales en el fondo son considerablemente grandes y nos hablan del hecho de que Holtún estaba rodeado de arquitectura importante. En el fondo yace una escultura de lo que llamamos el hombre-jaguar en forma de portaestandarte (**Figura 13**), que debe haber adornado la entrada de algún edificio importante en su época de gloria. La escultura fue probablemente decapitada ceremonialmente antes de ser arrojada al agua.



Figura 13. La escultura de lo que hemos llamado un hombre-jaguar yace a unos 30 m de profundidad en el cenote Holtún. Foto: Guillermo Pruneda/Archivo Proyecto GAM.

Muchas vasijas de cerámica intacta y algunas otras rotas hablan de las innumerables ofrendas que fueron hechas a los dioses en Holtún. Puede observarse también material esquelético, tanto de niños, como de adultos, que dejan claro que el depósito de seres humanos no estuvo limitado al Cenote Sagrado. Sin embargo, de las ofrendas de este cenote

destaca una que se encuentra actualmente a una profundidad entre 6 y 10 m. La información que nos revelan las fotogrametrías y los modelos 3D que hemos llevado a cabo como parte de nuestro Proyecto de Preservación Digital nos llevan a concluir que ésta es una ofrenda colocada cuidadosamente (**Figura 14**). Por la distribución de los elementos depositados en un nicho cavernario y en una zona alejada del centro del cenote, pensamos que el nivel del agua fue más bajo, por unos 10 m o más, en el momento en el que las ofrendas fueron colocadas. Las espinas de raya, comúnmente usadas para rituales de auto sangrado para propiciar lluvia, nos hablan de una gran necesidad de este elemento que garantizara la agricultura. Pareciera que los mayas que hicieron tales ritos se atrevieron a penetrar la entraña misma del inframundo para llevar a cabo las oblaciones y rituales para hacer una súplica muy cercana a Ch'aaac, el dios del agua.

El análisis del material cerámico depositado en la repisa y que llevamos a cabo *in situ*, arroja que pertenece en su mayoría al Clásico Terminal (siglo X de nuestra era). A través del fechamiento cerámico y el hecho de que la ofrenda fue cuidadosamente colocada en el sitio (ejemplo de esto son las tres espinas de raya, que muy probablemente fueron usadas por algunos sacerdotes colocados sobre la plataforma), indican que el nivel del agua en algún punto, alrededor del siglo X, pudo haber estado 10 m más abajo del nivel actual (**Figura 15**).

La teoría de las grandes sequías repetitivas que presuntamente sucedieron en el área maya es bien conocida. Se habla en particular de una serie de fuertes sequías, acontecidas una en el siglo VIII y dos más

Figura 14. Imagen de la ofrenda del cenote Holtún. La fotogrametría y las imágenes en 3D han facilitado el trabajo de registro en los cenotes de Yucatán. Foto: Corey Jaskolski/ Archivo Proyecto GAM.



Figura 15. Sin duda, algunos de los elementos más representativos de la naturaleza ritual del cenote Holtún son tres espinas de raya que habrían sido utilizadas para ceremonias de auto sangrado para invocar a la lluvia. Foto: Guillermo Pruneda/Archivo Proyecto GAM.

en los siglos IX y X, respectivamente (Cobos, de Anda y Moll, 2014; Gill, 2000; Yager y Hoddell, 2008). La idea de cambios notables en los niveles freáticos se refuerza a la luz de las nuevas evidencias arqueológicas del cenote Holtún.

Por último, y para añadir a la mencionada multifunción de los cenotes bajo la perspectiva de la nueva forma de percibir estas cavernas, Holtún parece tener relación con fenómenos astronómicos y calendáricos. Estas relaciones han sido estudiadas por De Anda (2012) y Montero-García *et al.* (2014). Estos investigadores identifican que El Castillo se encuentra en el centro de un cosmograma delimitado por los cenotes Sagrado al norte, Xtoloc al sur, Xkanjuyum al este y Holtún al oeste. De acuerdo con ellos, Holtún parece también relacionarse con el fenómeno astronómico del paso cenital del sol, días en los que el sol seguiría una trayectoria desde El Castillo hacia Holtún para ingresar y morir simbólicamente en el inframundo (**Figura 16**).




Figura 16. El descubrimiento de un fenómeno de luz en el cenote Holtún, relacionado con el evento astronómico del paso cenital del sol que ocurre dos veces al año, representa sin duda un gran avance para entender la múltiple función ritual de las oquedades de la península. Foto: Karla Ortega/Archivo Proyecto GAM.

Reflexiones finales

Las cuevas y cenotes son el rasgo más característico de la morfología kárstica peninsular. Estas oquedades representan, no solamente una de las fuentes de agua más grandes de nuestro país, sino que contienen valores agregados, tales como enormes galerías ricamente decoradas por formaciones naturales milenarias que atraen a miles de turistas todos los años. Son además, la última frontera de exploración en el mundo después de los océanos. En el aspecto arqueológico, muchos cambios se han dado con el advenimiento de la nueva disciplina de la arqueología de cuevas mayas, fundada hace ya más de tres décadas por James Brady. Hemos transitado a través de los conceptos iniciales del investigador Silvanus Morley, por ejemplo, que ya en la década de los treinta afirmaba que en las Tierras Bajas del Norte, en donde se encontrara un cenote, se encontraría un asentamiento, (Morley, 1994). El razonamiento de Morley va en el sentido de que a falta de corrientes de agua superficiales, los asentamientos necesitaban estar cerca de las zonas de acceso al agua subterránea. La idea es básica, los cenotes servían como las grandes cisternas naturales de los antiguos mayas en la zona. Sin embargo, y sin restar de ninguna manera importancia a su carácter funcional, los estudios de la moderna arqueología de cuevas mayas proponen un enfoque distinto, que se refiere al simbolismo de estas entradas a un plano del universo maya, que representa lo sobrenatural y lo divino. Las cuevas, secas o inundadas, eran sin duda la más fuerte referencia del paisaje ritual en esta zona del área maya. Los cenotes son al mismo tiempo el punto de origen de la vida y sitios de legitimación política, son lugares dicotómicos donde se manifiesta la vida y la muerte, convirtiéndose en conductos adecuados para el tránsito de los espíritus de los muertos. Son, además, observatorios astronómicos, el reino de las deidades, oráculos y sitios donde ocurre la sacralización de órdenes militares y el balance de las fuerzas cósmicas. ¿Cómo limitarlos entonces a la simple función de cisternas?

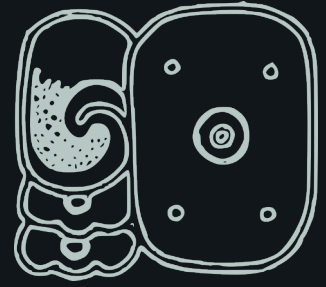
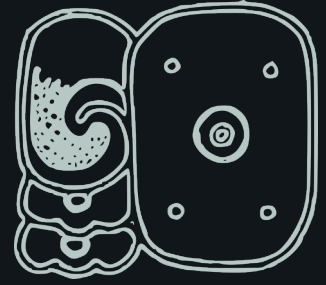
En estos sitios yace también, en un inesperado excelente estado de preservación, una enorme riqueza cultural y paleontológica. El pasado de la península se encuentra sumergido en ellos y de ellos depende el poder entender nuestro desarrollo histórico, muchas piezas del gran rompecabezas arqueológico y la antigua biogeografía histórica de la zona que se encuentran sumergidos en estas singulares cuevas.



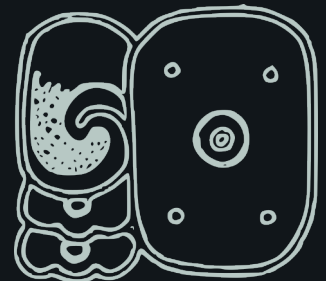
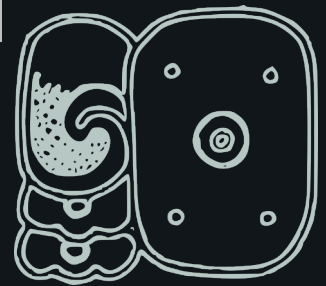
 *Cenote Kampepén, ubicado cerca del poblado de Chinquilá, Yucatán. Se pueden observar espeleotemas epifreáticos por sus formas globulares, así como una gran columna estalagmítica. Buzo: Alejandro Pérez. Fotografía de Benjamín Magaña Rodríguez.*



Cenote Chihuo Hol II, ubicado cerca del poblado de Mucuyché, Yucatán. Se pueden observar varios cráneos deformados, típico de la cultura maya, con ello, hombres, mujeres y niños conseguían alargar sus cabezas y alcanzar así su ideal de belleza.



Bibliografía



- Aguilar-Duarte, Y.G., 2009. Distribución espacial de las depresiones kársticas en planicies de Karst Tropical. In: *Informe de Actividades del Tercer Semestre del Doctorado en Geografía*. Anexo I. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. UNAM. México.
- Aguilar-Duarte, Y.G., Bautista, F., Mendoza, M.E., Frausto, O., & Ihl, T., 2016. Density of karst depressions in Yucatán state, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 78 (2), p. 51-60.
- Aguilar-Duarte, Y.G., Bautista, F., Mendoza, M.E., Frausto, O., Ihl, T., & Delgado, C., 2016. IVAKY: Índice de la vulnerabilidad del acuífero kárstico yucateco a la contaminación. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 15, núm. 3, 2016, pp. 913-933.
- Al-Kouri, O., Al-Rawashdeh, S., Sadoun, B., Sadoun, B., & Pradhan, B., 2013. Geospatial modeling for sinkholes hazard map based on GIS & RS data. *Journal of Geographic Information System*. 5 (6), 584.
- Alcocer, J., 2017. Mexican meromictic lakes: What we know so far. In: Gulati RD *et al.* (ed) *Ecology of Meromictic Lakes*. Springer, Berlin, pp. 353-375.
- Alcocer, J., and Escobar, E., 1996. Limnological regionalization of Mexico: Lakes & Reservoirs: Research and Management [*Lakes Reserv.: Res. Manage.*], vol. 2, no. 1-2, pp. 55-69.
- Alcocer, J., Lugo, A., & Sánchez, M.R., Escobar, E., & Sánchez, M., 1999. Bacterioplankton from cenotes and anchialine caves in Quintana Roo, Yucatan peninsula, Mexico. *Revista de Biología Tropical*. 47, pp. 19-26.
- Alcocer, J., Lugo, A., Marín, L., & Escobar, E., 1998. Hydrochemistry of waters from five cenotes and evaluation of their suitability for drinking-water supplies, northeastern Yucatán, México. *Hydrogeology Journal*. 6:293-301.
- Alcocer, J., 2017. Mexican Meromictic Lakes: What We Know So Far. En: Gulati, R.D., Zadereev, E.S., Degermendzhi, A.G. (Eds.). *Ecology of meromictic lakes*. Cham, Switzerland, Springer, pp. 353-375.
- Alonso, L.E., 2001. *Postfordismo, crisis y fragmentación de la sociedad de consumo: Los nuevos espacios de la distribución comercial y el comprador postmoderno*. En http://www.cccb.org/rcs_gene/alonso.pdf. Último acceso 5 octubre 2016.
- Álvarez, F., Iliffe, T.M., González, B., & Villalobos, J.L., 2012. *Triacanthoneus akumalensis*, a new species of alpheid shrimp (Crustacea: Caridea: Alpheidae) from an anchialine cave in Quintana Roo, Mexico. *Zootaxa*. 3154, pp. 61-68.
- Álvarez, F., Iliffe, T.M., Benitez, S., Brankovitz, D., & Villalobos, J.L.I., 2015. *New records of anchialine fauna from the Yucatan Peninsula, Mexico*. *Check List*. 11, pp. 1505.
- Álvarez, L.W., Alvarez, W., Asaro, F., & Michel, H.V., 1980. Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science*. 208: 1095-1108.
- Álvarez-Góngora, C., & Herrera-Silveira, J.A., 2006. Variations Of Phytoplankton Community Structure Related To Water Quality Trends In A Tropical Karstic Coastal Zone. *Marine Pollution Bulletin*. 52 pp. 48-60.

- Andenberg, M.R., 1973. *Cluster Analysis for Applications*. New York: Academic Press. 359 pp.
- Andrade, L.A., 1984. *Análisis de fluctuaciones y balance hídrico del acuífero de la zona de pozos de la JAPAY*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- Andrade, M., 2010. Transformación de los sistemas naturales por actividades antropogénicas. En: *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. R. Durán y M. Méndez (eds.). cicy/ppd-fmam/conabio/seduma, México.
- Andrews, E.W. IV., 1970. *Balankanche. Throne of the Tiger Priest*. Tulane University. Middle American Research Institute, Pub. 32.
- Angel, J., Nelson, D.O., Panno, S., 2004. Comparison of a new GIS-based technique and a manual method for determining sinkhole density: An example from Illinois' sinkhole plain. *Journal of Cave and Karst Studies*. 66. 9-17.
- Anónimo, 1989. Estudio geohidrológico del área de Progreso, Yucatán, México. Reporte técnico de la Coordinación Académica de Hidrología de la Unidad de Posgrado e Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán.
- Aranda-Cirerol, N., Herrera-Silveira, J., Comín, F.A., 2006. Nutrient water quality in a tropical coastal zone with groundwater discharge, northwest Yucatán, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 68: 445-454.
- Árcega-Cabrera, F., Fargher, L., Quesadas-Rojas, M., Moo-Puc, R., Ocegüera-Vargas, I., Noreña-Barroso, E., Yáñez-Estrada, L., Alvarado, J., González, L., Pérez-Herrera, N., Pérez-Medina, S., 2018. Environmental Exposure of Children to Toxic Trace Elements (Hg, Cr, As) in an Urban Area of Yucatan, Mexico: Water, Blood, and Urine Levels. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 100(5), 620-626.
- Árcega-Cabrera, F., Fargher, L., Ocegüera-Vargas, I., Noreña-Barroso, E., Yáñez, L. & Alvarado, J., González, L., Moo-Puc, R., Pérez-Herrera, N., Quesadas-Rojas, M., & Pérez-Medina, S., 2017. Water Consumption as Source of Arsenic, Chromium, and Mercury in Children Living in Rural Yucatan, Mexico: Blood and Urine Levels. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 99. 10.1007/s00128-017-2147-x.
- Árcega-Cabrera, F., Garza-Pérez R., Noreña-Barroso E. & Ocegüera-Vargas I. 2015. Impacts of geochemical and environmental factors on seasonal variation of heavy metals in a coastal lagoon Yucatan, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* 94, 58-65, 2015.
- Árcega-Cabrera, F., Velázquez-Talavera, N., Fargher, L., Derrien, M., & Noreña-Barroso, E., 2014. Fecal sterols, seasonal variability, and probable sources along the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of contaminant hydrology*, 41-49.
- Archivo general de la Nación, UNAM, 1998. La península de Yucatán.

- Arias-González, J.E., González-Gándara, C., Cabrera, J.L., & Christensen, V. 2011. Predicted impact of the invasive lionfish *Pterois volitans* on the food web of a Caribbean coral reef. *Environmental Research*. 111(7), pp. 917–925.
- Ashmore, W., 1991. Site Planning principles and Concepts of Directionality among the Ancient Maya. *Latin Amer Antiq* 2(3):199-226.
- ASK (Amigos de Sian Ka'an), 2003. Tratamiento de Aguas Residuales: construyendo las Bases para la Conservación del Agua y su Biodiversidad Asociada en la Península de Yucatán [*Tratamiento de aguas residuales: construyendo las bases para la conservación del agua y la biodiversidad asociada en la Península de Yucatán*]. CD-ROM, Amigos de Sian Ka'an, The Nature Conservancy y la Comisión de Áreas Naturales Protegidas, Cancún, Quintana Roo, México.
- ATSDR, 2005. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry Toxicological Profile for Hexachlorocyclohexanes*. U.S. Department of Health & Human Services, Public Health Service
- Augé, M., Herzlich, C., 1984. *Le sens du mal*. Anthropologie, histoire, sociologie de la maladie, Paris-Montreux, Ed. des Archives contemporaines.
- Back, W., & Lesser, J.M., 1981. Chemical constrains of groundwater management in the Yucatan Peninsula, Mexico. Beard, L.R., Ed., Water for Survival. *Journal of Hydrology*. Vol. 51, pp. 119 -130.
- Back, W., Hanshaw, B., 1970. Comparison of chemical hydrogeology of the carbonate peninsulas of Florida and Yucatan. *Journal of Hydrology* 10, pp. 330-368.
- Bakalowicz, M., 1999. *Connaissance et gestion des ressources en eaux souterraines dans les régions karstiques. Bassin Rhone-Mediterranee-Corse. Guide technique n°3*. Agence de l'Eau. Édition Juin. 44 pp.
- Balam, Y. (2010). *Tulum. Mayas y turismo*. Chetumal: Universidad de Quintana Roo, 380 pp.
- Balarajan, R., Soni-Raleigh, V., Yuen, P., Wheeler, D., Machin, D., & Cartwright, R., 1991. Health risk associated with bathing in sea water. *BMJ*. 303:1444-1445
- Barrera-Vásquez, A. y Rendón, S., 1988. *El Libro de los Libros De Chilam Balam*. Fondo de Cultura Económica. FCE, Popular, 42, México, 212 pp.
- Barrera-Vásquez, A., 1981. *Estudios lingüísticos*, Fondo Editorial de Yucatán.
- Barrera-Vásquez, A., 1982. Los petenes del noroeste de Campeche. Su exploración ecológica en perspectiva. *Biótica*. 7 (2), pp. 163-169.
- Barrientos-Medina, R.C., 1999. *Revisión de las subespecies nominales de la mojarra rayada, "Cichlasoma" urophthalmus Günther, 1862 (Teleostei: Cichlidae) en el Estado de Yucatán, México*. Tesis, Universidad Autónoma de Yucatán.

- Bartram, J., & Rees, G., 2000. *Monitoring Bathing Waters-A Practical Guide to the Design and Implementation of Assessments and Monitoring Programmes*. E&FN Spon, New York.
- Bassie, K. 1991. *From the Mouth of the Dark Cave. Commemorative Sculpture of The Late Classic Maya*. University of Oklahoma Press, Norman and London.
- Basso, A., Bruno, E., Parise, M., & Pepe, M. 2013. Morphometric analysis of sinkholes in a karst coastal area of southern Apulia (Italy). *Environmental Earth Sciences*. 70 (6), 2545–2559.
- Batista, J., Pérez-Flores, M.A. & Urrutia-Fucugauchi, J. 2013. Three-dimensional gravity modeling of Chicxulub crater structure, constrained with marine seismic data and land boreholes. *Earth Planets Space*, 65: 973-983.
- Batllore-Sampedro, E.A., 2016. Condiciones actuales del agua subterránea en la Península de Yucatán. En M. Chávez-Guzmán (Ed.), *El manejo del agua a través del tiempo en la península de Yucatán* (pp. 201-227). México: Universidad Autónoma del Estado de Yucatán, Centro de Estudios Dr. Hideyo Noguchi, Unidad de Ciencias Sociales, Fundación Gonzalo Río Arronte IAP, Consejo de Cuenca de la Península de Yucatán.
- Bauer-Gottwein, P., Gondwe, B.R.N., Charvet, G., Marín, L.E., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G. 2011. Review: The Yucatán Peninsula karst aquifer, Mexico. *Hydrogeology Journal*. 19: 507–524.
- Bauer, C., 2015. Analysis of dolines using multiple methods applied to airborne laser scanning data. *Geomorphology*. 250, 78–88
- Bautista, F., Pacheco, A., Bautista-Hernández, D.A., 2016. *Análisis del cambio climático con datos mensuales* (Clic-MD). Skiu, México. 60 pp.
- Bautista, F., Palacio, G., Quintana, P., Zinck, A.J., 2011. Spatial distribution and development of soils in tropical karst areas from the Peninsula of Yucatán, Mexico. *Geomorphology* 135: 308-321.
- Bautista, F. & Palacio, G., 2011. *Parte III. Regionalización edáfica del territorio de México Capítulo 24. Península de Yucatán*. Pavel Krasilnikov, Francisco Javier Jiménez Nava, Teresa Reyna Trujillo y Norma Eugenia García Calderón (editores). Facultad de Ciencias, UNAM. 462 pp.
- Bautista, F., Aguilar, Y., & Batllori, E., 2011. Amenazas, vulnerabilidad y riesgo de contaminación de las aguas subterráneas en la Península de Yucatán. *Teoría y Praxis*. (9), 9-31.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., & Aguilar, Y. 2015. Actualización del mapa de suelos del Estado de Yucatán México: Enfoque geomorfopedológico y WRB. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 2(6), 303-315.
- Bautista, F., Palma-López, D., Huchin-Malta, W., 2005. Actualización de la clasificación de los suelos del estado de Yucatán, pp. 105-122. En: F. Bautista y G. Palacio (eds.) *Caracterización y Manejo de los Suelos de la Península de Yucatán. Implicaciones Agropecuarias, Forestales y Ambientales*. Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología, p. 282

- Bautista, F., Batllori, E., Ortiz-Pérez, M., Palacio, G. & Castillo-González, M., 2003. Geoformas, agua y suelo en la Península de Yucatán. Campeche, Campeche, México: Universidad Autónoma de Campeche: Universidad Autónoma de Yucatán: Instituto Nacional de Ecología.
- Bautista-Zúñiga, F., Jiménez-Osornio, J., Navarro-Alberto, J., Manu, A., Lozano, R., 2003. Microrelieve y color del suelo como propiedades de diagnóstico en Leptosoles cársticos. *Tierra Latinoamericana*, pp. 1-11.
- Beddows, P., 1999. *Conduit Hydrogeology of a Tropical Coastal Carbonate Aquifer: Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula*, MS Thesis, McMaster University, Hamilton.
- Beddows, P., Blanchon, P., Escobar, E., Torres-Talamante, O., 2008. *Los cenotes de la península de Yucatán*; Vol. 14, N°. 83 (en.-feb.)
- Beddows, P. & Smart, P. & Whitaker, F., & Smith, S.L., 2002. *Density stratified groundwater circulation on the Caribbean Coast of the Yucatan Peninsula, Mexico*. *Karst Frontie.* 7. 129-134.
- Behrooz, R., Sari, A., Bahramifar, N., Naghdi, F. & Shahriyari, A.R., 2009. Organochlorine pesticide and polychlorinated biphenyl residues in human milk from Tabriz, Iran. *Toxicological & Environmental Chemistry*. 91. 1455-1468. 10.1080/02772240902732472.
- Bell, C., Morgan, J., Hampson, G., & Trudgill, B. 2004. Stratigraphic and sedimentological observations from seismic data across the Chicxulub impact basin. *Meteoritics Planetary Science*, 39: 1089-1098.
- Benavides, A. 2014. Sistemas de conocimiento Mayas y turismo Premium en la Península de Yucatán. *Pasos. Revista de Turismo y Patrimonio Cultural*. 12. 885-898. 10.25145/j.pasos.2014.12.065.
- Bennett, R., 1993. *The ancient Maya causeway in Yucatán*. Museum of the American Indians, Indians Notes VII: 347-382.
- Bergel, S., 2007. Responsabilidad Social y Salud. *Bioética*. ISSN 1657-4702 / Volumen 7 / Edición 12 / pp. 10-27.
- Blanton, R.E & Fargher, L.F., 2008. *Collective Action in the Formation of Premodern States*. Springer, New York
- Bögli, A., 1965. The roll of the corrosion in cave forming. En: O. Stekl (eds). *Problem of the speleological research*. Czechoslovak Academy of Science. 125-131pp. Praga
- Bögli, A., 1980. *Karst Hydrology and Physical Speleology*. Springer-Verlag, 271 p. Berlin.
- Bolles, D. y William, F., 2001. *Combined Dictionary Concordance of the Yucatecan Maya Laguage. An analysis of Roads listed in the Colonial Dictionaries and their relevance to Prehispanic Linear Features in the Yucatan Peninsula*. Reporte Presentado a FAMSI. www.famsi.org/reports/96072/zakbeart.htm
- Bondesan, A., Meneghel, M., & Sauro, M. 1992. Morphometric analysis of dolines. *International Journal of Speleology*. 21, 1-55.

- Bonet, F., & Butterlin, J., 1962. *Stratigraphy of the northern part of the Yucatan Peninsula*. New Orleans Geological Society, New Orleans, USA. 52-57.
- Bonor-Villarejo, J.L., 1989. *Las Cuevas Mayas: Simbolismo y Ritual*. Editorial de la Universidad Complutense-Instituto de Cooperación Iberoamericana, Madrid.
- Botella, B., Crespo, J., Rivas, A. & Cerrillo, I., Olea-Serrano, M. & Olea, N., 2004. Exposure of women to organochlorine pesticides in Southern Spain. *Environmental research*. 96. 34-40. 10.1016/j.envres.2003.10.001.
- Boxshall, G.A., Zylinski, S., Jaume, D., Illife, T.M., & Suárez-Morales, E., 2014. A new genus of speleophriid copepod (*Copepoda: Misophrioida*) from a cenote in the Yucatan, Mexico with a phylogenetic analysis at the species level. *Zootaxa*. 3821, pp. 321-336
- Brady, J.E. 1989. *An investigation of Maya Ritual Cave Use with special reference to Naj Tunich, Petén, Guatemala*. Tesis doctoral, University of California at Los Angeles.
- Brady, J.E. 1991. *Caves and Cosmovisión at Utatlan*. California Anthropologist, Vol. XVIII, Núm. 1.
- Brady, J.E., y Ashmore, W., 1999. Mountains, Caves, Water: Ideational Landscapes of the Ancient Maya. En *Archaeologies of Landscape Contemporary Perspectives*, Editado por Wendy Ashmore and A. Bernard Knapp. pp. 125-145. Blackwell Publishers.
- Brady, J.E., 2002. *Significado del estudio de las cuevas y cenotes para el entendimiento de la cosmovisión maya*. Ponencia presentada en el Primer Congreso de Arqueología Subacuática y Espeleológica, Mérida, Yucatán.
- Brady, J.E. y Prufer, K.M., 2005. Introduction: A History of Mesoamerican Cave Interpretation. En *In the Maw of the Earth Monster. Mesoamerican Ritual cave Use*. Editado por James E. Brady and Keith M. Prufer. pp. 1-17. University of Texas Press, Austin.
- Brady, J.E. et al., 1997. Glimpses of the Dark Side of the Petexbatun Regional Archaeological Project: The Petexbatun Regional Cave Survey. *Ancient Mesoamerica* 8 (2):353-364.
- Brady, J.E., & Veni, G., 1992. Man-made and pseudo-karst caves: The implications of subsurface features within Maya centers. *Geoarcheology: An International Journal*, 7, 149-168.
- Brady, J.E., 1996. *Retorno a las Cavernas de Copan: Otra Evaluación Preliminar*. Yaxkin XV: 99-118.
- Brankovits, D., Pohlman, J., Niemann, H. et al. 2014 *Evidence for a methane-fueled ecosystem within anchialine caves of the Yucatan Peninsula, Mexico*. American Geophysical Union, Fall Meeting 2014, abstract id. B24A-05
- Brenner, M., Hodell, D.A., Curtis, J.H., Rosenmeier, M.F., Anselmetti, F.S. & Ariztegui, D., 2003. Paleolimnological approaches for inferring past climate change in the Maya Region: recent advances and methodological limitations. En: Pompa Arturo Gomez, Fedick, Scott, Jimenez-Osornio, Juan J. (Eds.), *The lowland Maya Area: Three Millenia at the Human-Wildland Interface; 21st Symposium on Plant Biology*. The Haworth Press, Inc., Binghamton, NY, pp. 45-75.

- Brewerton, L.T., 1993. *Aquifer properties of samples from Merida, Yucatan, Mexico, British Geological Survey*. Technical Report WD/93/50. Hydrogeology series.
- Brinkmann, R., Parise, M., Dye, D., 2008. Sinkhole distribution in a rapidly developing urban environment: Hillsborough County, Tampa Bay area, Florida. *Engineering Geology*. 99. 169-184. 10.1016/j.enggeo.2007.11.020.
- Brophy, J., Margaret, M., Keith, A., Watterson, R., Park, M., Gilbertson, E., Maticka-Tyndale, M., Beck, H., Abu-Zahra, K., Abraham, R., De Matteoand, R., Luginaah, I., 2012. Breast cancer risk in relation to occupations with exposure to carcinogens and endocrine disruptors: a Canadian case-control study. *Environmental Health* 2012, 11:87.
- Bruno, G., Stiefkens, L., Hadid, M., Liscovsky, I., Cosa, M.T. & Dottori, N., 2008. Efecto de la contaminación ambiental en la anatomía de la hoja de *Ligustrum lucidum* (Oleaceae). *Bol. Soc. Argent. Bot.* 42 (3-4): 231-236.
- Buckley, D.K., MacDonald, D.M.J., Villasuso, P.M., Graniel, C.E., Vázquez, M.J. y Virgilio, J.M., 1994. *Geophysical logging of a karstic limestone aquifer for hydrogeological purposes at Merida, Yucatan, Mexico*. British Geological Survey. Technical Report WD/94/4C. Hydrogeology series.
- Buerge, I.J., Poiger, T., Muller, M.D., & Buser, H., 2003. Caffeine, an anthropogenic marker for wastewater contamination of Surface waters. *Environmental Science and Technology*. 37:691-700.
- Butterlin, J. & Bonet, F. 1960. Información básica para la interpretación geohidrológica de la Península de Yucatán. En: *Enciclopedia Yucatanense*. T.X. Edición del Gobierno del Estado de Yucatán, México.
- Caamal-Sosa, J.P., Zaldívar, A., Adame-Vivanco, F., Teutli, H.C., Andueza, M.T., Pérez, R., Herrera-Silveira, J.A., 2012. Almacenes de carbono en diferentes tipos ecológicos de manglares en un escenario kárstico. En Paz, F. y R. Cuevas (editores). 2012. *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México. Síntesis a 2011. Texcoco, Estado de México, México*. ISBN 978-607-715-085-5. 887 p.
- Cabrera, S.A., 1986. *Hidrogeoquímica del agua subterránea en acuíferos kársticos. Un caso de estudio*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México, 57 p.
- Calderón, J.R. & Orozco, M.E., 2009. *Planeación y Modelo Urbano. El caso de Cancún*, Quintana Roo. *Quivera* 11(2):18-34.
- Calderón-Gutiérrez, F., 2013. *Riqueza taxonómica y línea base ecológica de los macroinvertebrados bentónicos troglobiontes del sistema cavernícola anquialino "El Aeralito", isla Cozumel, Quintana Roo, México*. Tesis, Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Calderón-Mandujano R., Bahena-Basave, H., Calmé, S., 2008. *Anfibios y reptiles de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an y zonas aledañas*. 2ª ed. CONABIO, ECOSUR, PNUD, SHMAC, Chetumal

- Ćalić, J. 2011. Karstic uvala revisited: Toward a redefinition of the term. *Geomorphology*, 134, pp. 32-42.
- Calinski, T. & Harabasz, J., 1974. A dendrite method for cluster analysis. *Communications in Statistics*. 3 (1), pp. 1-27.
- Cámara-Novelo, A., 2007. *Análisis de la Influencia de las Mareas Sobre el Flujo Subterráneo y Técnicas de Filtrado de su Efecto*. Tesis de Licenciatura de Ingeniero Civil, Facultad de Ingeniería de la UADY.
- Camargo, T., Escalera-Vázquez, L.H., & Zambrano, L., 2013. Fish community structure dynamics in cenotes of the Biosphere Reserve of Sian Ka'an, Yucatán Peninsula, Mexico. *Revista Mexicana de Biodiversidad*. 84, pp. 901-911
- Campbell, J. 1987. *The Power of Myth* (con Bill Moyers). Grabación de audio.
- Canadell, J.G., Quéré, C.L., Raupach, M.R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R.A. & Marland, G., 2007. Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104:18866-18870.
- Canter, K.L., Stearns, D.B., Geesaman, R.C., and Wilson, J.L., 1993. Paleostructural and related paleokarst control on reservoir development in the Lower Ordovician Ellenburger Group, Val Verde Basin, Texas, En: R.D. Fritz, J.L., Wilson, and D.A. Yurewicz, eds., *Paleokarst-related hydrocarbon reservoirs*. *SEPM Core Workshop* 18, pp. 61-101.
- Carcavilla, L., 2007. La divulgación de la geología en espacios protegidos: las geo-rutas del Parque Natural del Alto Tajo (Guadalajara). *Revista de la Asociación Española para la Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15.1, 65-76.
- Carcavilla, L., 2012. *Geoconservación*. Editorial La Catarata e Instituto Geológico y Minero de España. 126 pp.
- Carcavilla, L., Berrio, M.P., Belmonte, A., Durán, J.J., & López-Martínez, J., 2010. La divulgación de la Geología al gran público: principios y técnicas para el diseño de material escrito. En: *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural*, 104 (1-4), 93-110. Sección Geológica.
- Carcavilla, L., López-Martínez, J. & Durán, J.J., 2007. *Patrimonio geológico y geodiversidad: investigación, conservación, gestión y relación con los espacios naturales protegidos*. Instituto Geológico y Minero de España. *Serie Cuadernos del Museo Geominero*, nº 7. Madrid. 360 p.
- Cargile, L.L., 1969. A case history of the Pegasus Ellenburge reservoir. *Journal of Petroleum Technology*, 1330-1336 pp.
- Carmona-Lara, M. del C., 2017. Regulación del agua subterránea: Asunto de seguridad nacional. Obtenido de *Las asimetrías en la gestión y regulación del agua subterránea en América del Norte*: <https://www.youtube.com/watch?v=nZZjuoehrDo>

- Carmona-Lara, M. del C., Carrillo-Rivera, J.J, Hatch-Kuri, G., Huizar-Álvarez, R., & Ortega-Guerrero, M.A., 2017. *Ley del Agua Subterránea. Una propuesta*. Ciudad de México: UNAM, IGg, IGI, CISAN, Centro de Geociencias, IJ.
- Carreño, A.L., & Montellano-Ballesteros, M. 1997. (eds.). *Extinción masiva del límite Cretácico-Terciario; mitos y realidades: Unión Geofísica Mexicana, Monografía 4*.
- Carrillo, M., Estrada, E. & Hazen, T.C. 1985. Survival and enumeration of fecal indicators Bifidobacterium adolescentes and Escherichia coli in a tropical rain forest watershed. *Applied Environmental Microbiology*. 50:468-476.
- Carrillo-Rivera, J. J., & Domínguez, J., 2007. El agua subterránea como elemento de debate en la historia de México. En A. Mayer (Ed.), *Congreso Internacional Hacia la conmemoración del Bicentenario de la Independencia y el Centenario de la Revolución Mexicana. Retos y perspectivas*. Ciudad de México: UNAM.
- Carvalho, F.P. 2006. *Agriculture, pesticides, food security and food safety*. *Environmental Science Pollution R*. 9(7), 685-692. doi:10.1016/j.envsci.2006.08.002
- Castañares, M.E.J., 2009. *Sistemas complejos y gestión ambiental. El caso del Corredor Biológico Mesoamericano*. CBMM, Serie Conocimientos / Número 6. CONABIO. México.
- Castro-Graniel, E., 2010. Hidrología. En R. Durán, & M. Méndez (Edits.), *Desarrollo Humano en Yucatán* (pp. 12-13). Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- Cavazos, R.N., Zarate, R.L. & Torres de Navarro, E., 2001. Phosphorus and caffeine determination and quantification in soft cola drinks. *Educación Química*, 12:116-120.
- CCA. 2016. *Carbono azul en América del Norte: evaluación de la distribución de los lechos de pasto marino, marismas y manglares, y su papel como sumideros de carbono*. Comisión para la Cooperación Ambiental, Montreal, Canadá, 58 pp.
- CDESC. 2003. Observación general N° 15 (2002). *El derecho al agua* (artículos 11 y 12 del Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales) (pp. 1-19). Ginebra: Organización de las Naciones Unidas.
- Ceballos, G., Díaz-Pardo, E., Martínez-Estévez, L., Espinoza-Pérez, H., 2016. *Los peces dulceacuícolas de México en peligro de extinción*. Fondo de Cultura Económica, 487 p.
- Cervantes-Martínez, A., Elías-Gutierrez, M., Suárez-Morales, E., 2002. Limnological and morphometrical data of eight karstic systems "cenotes" of the Yucatan Peninsula, Mexico, during the dry season (February-May, 2001). *Hydrobiología* 482: 167-77.
- Cervantes-Martínez, A., Coronado-Álvarez, L., 2007. Evaluación del potencial pesquero de cenotes de Quintana Roo. Una aproximación metodológica. *Teoría y Praxis*, 4: 37-46.
- Chambers, J.E., Boone, J.S., Carr, R.L., Chambers, H., & Strauss, D.L., 2002. Biomarkers as predictors in health and ecological risk assessment. *Hum Ecol Risk Assess*. 8(1): 165-176.

- Chaudhuri, D., & Samal, A., 2007. A simple method for fitting of bounding rectangle to closed regions. *Pattern Recognition* 40 (7), pp. 1981-1989.
- Chumba-Segura, L., Barrientos-Medina, R.C., 2010. Peces dulceacuícolas. En: Durán, R., Méndez, M. (Eds). *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, pp. 253-254.
- Cigna, A.A., 2016. Tourism and show caves. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 60, 2, 217-233.
- Clottes, J., Lewis-Williams, D., 2010. *Los chamanes de la prehistoria*. Editorial Ariel. pp. 200.
- CNDH. 2014. *El Derecho Humano al Agua Potable y al Saneamiento*. Ciudad de México: Comisión Nacional de Derechos Humanos.
- Cobos, V., Barrientos, R., Navarro, J., Rendon-von Osten, J., 2014. Plaguicidas organoclorados: contaminantes persistentes en cenotes de Yucatán. *Bioagrociencias*, 7(1):24-27.
- Cobos-Rafael, De Anda, G., Moll, R., 2014. *Ancient climate, and archaeology: Uxmal, Chichén Itzá, and thier collapse at the end of the Terminal Classic period*. A.F. Chase and V.L. Scarborough. pp. 56-71.
- Colborn, T., vom Saal, F.S., Soto, A., 1993. Developmental effects of endocrine-disrupting chemicals in wildlife and humans. *Environ Health Perspect* 101, 378-384.
- Cole, L.J., 1910. "The caverns and people of northern Yucatán", *Bull. American Geogr. Soc.* 42
- Collins, G.S., Morgan, J., Barton, P., Christeson, G.L., Gulick, S., Urrutia-Fucugauchi, J., Warner, M.R., & Wünnemann, K., 2008. Dynamic modeling suggests terrace zone asymmetry in the Chicxulub crater is caused by target heterogeneity. *Earth Planetary Science Letters*, 270:221-230.
- Collins, S.V., Reinhardt, E.G., Rissolo, D., Chatters, J.C., Nava-Blank, A., Luna-Erreguerena, P., 2015. Reconstructing water level in Hoyo Negro, Quintana Roo, Mexico, implications for early Paleoamerican and faunal access, *Quaternary Science Reviews*, Volume 124, 2015. 68-83 p.
- COMEY. 2011. *Programa integral de desarrollo metropolitano PIDEM II. Análisis estratégico de la ZMM II*. 5 Perfil Geoambiental.
- Comín, F.A., Herrera-Silveira, J.A., García, C., & Martín, M., 1996. Caracterización física y Química de los cenotes de Yucatán (SE México). Proceedings of the International Conference on *Recursos Hídricos en Regiones Karsticas*, Vitoria-Gasteiz, Octubre 14-17 Spain. Gráficas Santa María 357-366.
- CONABIO. 2017. Shapefiles Consulta del geoportal <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> en diciembre de 2017.
- CONAGUA. 2009. Criterio para la delimitación de los acuíferos. Mapa que ilustra la localización y límites de los acuíferos. Tablas con las coordenadas geográficas de las poligonales simplificadas que definen los límites. Recuperado en abril de 2018, de Delimitación de

acuíferos de CONAGUA <https://datos.gob.mx/busca/dataset/delimitacion-de-acuiferos-de-conagua>

CONAGUA. 2015. Situación del Subsector Agua Potable, Drenaje y Saneamiento. Recuperado de http://www.cmic.org/comisiones/Sectoriales/infraestructurahidraulica/estadisticas/Estadisticas_2014-2018/Publicaciones_2015/DSAPAS%202015.pdf

CONAGUA. 2015. *Programa Hídrico Regional 2014-2018 de la región Hidrológico-Administrativa XII Península de Yucatán*. México: CONAGUA.

CONAGUA. 2016. *Situación del subsector agua potable, drenaje y saneamiento*. Edición 2016. México: CONAGUA .

CONAGUA. 2009. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (3105) Península de Yucatán, Estado de Yucatán. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. Diario Oficial de la Federación. Ciudad de México. 23.

CONAGUA. 2014. *Estadísticas del Agua*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT.

CONAGUA. 2015. Subdirección General Técnica. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. Actualización de la disponibilidad media anual del agua en el acuífero de la Península de Yucatán (3105), Estado de Yucatán. Publicada en el Diario Oficial de la Federación. 20 de abril 2015.

CONAPO. 2011. Consejo Nacional de Población. Índice de Marginación por Entidad Federativa y Municipio. Recuperado de http://www.conapo.gob.mx/work/models/CONAPO/indices_margina/mf2010/CapitulosPDF/1_4.pdf

Connors, M., Hildebrand, A.R., Pilkington, M., Ortiz-Alemán, C., Chávez, R.E., Urrutia-Fucugauchi, J., Graniel-Castro, E., Camara-Zi, A., Vásquez, J., & Halpenny, J.F., 1996. Yucatan karst features and the size of Chicxulub crater. *Geophysical Journal International*, 127: F11-F14.

Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. 1917, México.

Convenio de Estocolmo. 2009. *The new POPs under the Stockholm Convention*. Recuperado de <http://chm.pops.int/Convention/ThePOPs/tabid/2509/Default.aspx>

Convenio de Rotterdam. 2015. Chemicals Subject to the Procedure of Prior Informed Consent. Recuperado de <http://www.pic.int/EIConvenio/Generalidades/TextodelConvenio/tabid/1980/language/es-CO/Default.aspx>

Cooper, Jr. H.H., 1959. A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. *Journal of Geophysical Research*. V. 64, No. 4, pp. 461-467.

Córdoba, J. & García, A. 2003. Turismo, globalización y medio ambiente en el Caribe mexicano. *Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*. 52, pp. 117-136.

- Córdoba, J. 2009. Tourism, development and disneyzation: A question about resources or inventiveness? *Investigaciones Geográficas*. 70. 33-54.
- Cornejo, A., & Hernández, A. 1950. Las anomalías gravimétricas en la cuenca salina del Istmo, planicie costera de Tabasco, Campeche y Yucatán. *Boletín Asociación Mexicana Geólogos Petroleros*, 2, pp. 453-460.
- Corraliza, J.A., García-Navarro, J. & Valero, E., 2001. *Los Parques Naturales en España: conservación y disfrute*. Fundación A. Martín Escudero. Grupo Mundiprensa. Madrid. 491 p.
- Craig, D.H., 1988. Caves and Other Features of Permian Karst in San Andres Dolomite, Yates Field Reservoir, West Texas. En: James N.P., Choquette P.W. (eds) *Paleokarst*. Springer, New York, NY.
- Cubas, F., Llano, M., & De Rosenzweig, L.D., 2017. El misterio del agua subterránea. Recuperado de <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/08/El-misterio-del-agua-subterranea-en-Mexico.pdf>
- Cupul-Magaña, F.G. & Shelley, R.M., 2015. Nuevas localidades para ocho especies de milpiés (*Arthropoda: Diplopoda*) en México. *Dugesiana*, 18, pp. 91-94.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Omega (2 Vol.) 2359 pp.
- Cvijic, J., 1893. Das karsphänomen. *Geogr. Abhand.*, 5, 215-319.
- Dahmardeh, M., Ghanbari, A., Syasar, B., Ramrodi, M., 2009. Intercropping maize (*Zea mays* L.) and cow pea (*Vigna unguiculata* L.) as a whole-crop forage: Effects of planting ratio and harvest time on forage yield and quality. *J. Food Agric. Environ.*, 7 (2): 505-509.
- Daughton, C.G., & Ternes, T., 1999. Pharmaceuticals and Personal Care Products in the Environment: Agents of Subtle Change? *Environmental Health Perspective Special Report*, 107(6): 908-938.
- Davies, D.L., & Bouldin, D.W., 1979. A Cluster Separation Measure. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. Vol. PAMI-1, No. 2, pp. 224-227.
- Davis, W.E., 1949. Features of caves breakdown. *National Speleothem Society Bulletin*. 11, pp. 34-35.
- Day, K., & Scott, I.M., 1990. Use of acetylcholinesterase activity to detect sublethal toxicity in stream invertebrates exposed to low concentrations of organophosphate insecticides. *Aquat Toxicol*. 18:101-114.
- De Anda, G., 2012. *Caves of the Maya Dead*. Nat Geo Live: <https://www.youtube.com/watch?v=7AcAxSJi0iO>
- De Anda, G., García, D., and Cobos, R., 2016. Arqueología Subacuática en un contexto del Clásico Terminal: el Cenote Holtún de Chichen Itzá, en Rafael Cobos (ed.), *Arqueología en Chichen Itzá: nuevas explicaciones*. Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida. p. 255.

- De Anda, G., Tiesler, V. y Zabala, P., 2004. Cenotes, espacios sagrados y la práctica del sacrificio humano en Yucatán, en *Los Investigadores de la Cultura Maya 12*, tomo II. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México. pp. 376-386.
- De la Garza, M. 1998. *Rostros de lo sagrado en el mundo maya*. Paidós-UNAM. Facultad de Filosofía y Letras. México.
- De la Garza, M., 2019. La sacralidad del agua y la cueva. En *La Historia Secreta del Gran Acuífero Maya*, (en prensa).
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R., Bautista, F., 2010 Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment: The case of Yucatan, Mexico. *Agr Water Manage* 97: 1423–1433
- Demiralin, A.S., Hurley, N.F., & Oesleby, T.W., 1993. Karst breccias in the Madison Limestone (Mississippian), Garland field, Wyoming. En: R.D. Fritz., J.L. Wilson. y D.A. Yurewicz (Eds.). *Paleokarst related hydrocarbon reservoirs*. Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists, Core Workshop, 18, 101-118 pp.
- Denizman, C., & Randazzo, A.F., 2000. Post-Miocene subtropical karst evolution, lower Suwannee River Basin, Florida. *Geological Society of America Bulletin*. 112. 10.1130/0016-7606(2000)112<1804:PMSKEL>2.0.CO;2.
- Denizman, C., 2003. Morphometric and spatial distribution parameters of karstic depressions, lower Suwannee River basin, Florida. *Journal of Cave and Karst Studies*. 65. 29-35.
- Descola, P., y Palsson, G. (Coord.), 2001. [1996]. *Naturaleza y sociedad: perspectivas antropológicas*. Traducción de Stella Mastrangelo. México: Siglo XXI.
- Diamanti-Kandarakis, E., Bourguignon, J.P., Giudice, L.C. *et al.*, 2009. Endocrine-disrupting chemicals: an endocrine society scientific statement. *Endocr. Rev.* 30 (4), 293-342 (2009).
- Díaz-Barriga, F. 2003. "Cognición situada y estrategias para el aprendizaje significativo", en *Revista Electrónica de Investigación Educativa*, (en línea), 5(2), pp. 105-117. Disponible en: [http://redie.ens.uabc.mx/vol5no2/ contenido-arceo.html](http://redie.ens.uabc.mx/vol5no2/contenido-arceo.html) cap3 [consulta: 10 de julio de 2012].
- Doctor, D.H., & Young, J.A., 2013. *An Evaluation of Automated GIS Tools for Delineating Karst Sinkholes and Closed Depressions From 1-meter LiDAR-derived Digital Elevation Data*. 13TH Sinkhole Conference NCKRI Symposium 2, 449-458.
- Doehring, D.O., Butler, J.H., 1974. Hydrogeologic constraints on Yucatán's development. *Science* 186 (4164), 591-595.
- DOF. 2013. Diario Oficial de la Federación del Gobierno del Estado de Yucatán. Decreto que establece el área natural protegida denominada Reserva Estatal Geohidrológica del Anillo de Cenotes. Recuperado de <http://dx.doi.org/ww.conacyt.mx/cibiogem/images/.../1-Dec-RESERVANILLO-CENOTES.pdf>

- Domínguez, N.J.M., 1993. Estudio geohidrológico del área de Valladolid, Yucatán. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Yucatán, Facultad de Ingeniería.
- Donald, D.B., Block, H. & Wood, J., 1997. Role of ground water on hexachlorocyclohexane (lindane) detections in surface water in western Canada. *Environmental Toxicol Chem* Volume 16, 1997, pp 1867-1872.
- Douglas, M., & Wildavsky, A.B., 1982. *Risk and culture: An essay on the selection of technical and environmental dangers*. Berkeley: University of California Press.
- Douglas, M., 1992. *Risk and Blame*. Essays In Cultural Theory, New York, Routledge.
- Dowling, R.K. & Newsome, D. (Eds.). 2006. *Geotourism*. Elsevier y Butterworth Heinemann. Oxford, Reino Unido.
- Dowling, K. 2009. Geotourism's contribution to local and regional development. In: Jornadas sobre a Funcao Social Museu, 18, Idanha-a-Nova. Anais... Idanha-a-nova: Camara municipal de Idanha-a-Nova, 2009. p. 15-37.
- Dufor, A.P. & Ballentine, P., 1986. Ambient Water Quality Criteria for Bacteria-1986 (*Bacteriological ambient water quality criteria for Marine and fresh recreational waters*). EPA A440/5-84-002. USEPA, Washington D.C.
- Dupuit, J., 1863. *Etudes Théoriques et Pratiques sur le mouvement des Eaux dans les canaux découverts et à travers les terrains perméables* (Second ed.). Paris: Dunod.
- Durán, J.J., & Robledo, P.A. (Eds.), 2012. Las cuevas turísticas como activos económicos: conservación e innovación. Editorial Casiopea. 480 pp.
- Durán, R., y Méndez, M. (eds.). 2010. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán*. Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, México.
- Eastmond, A., & García de Fuentes, A. 2010. Impacto de los sistemas agropecuarios sobre la biodiversidad. En R. Durán, & M. Méndez (Edits.), 2010. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán* (pp. 98-104). Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, México.
- Eberl, M. 2005. *Muerte, entierro y ascensión. Ritos funerarios entre los antiguos mayas*. Universidad Autónoma de Yucatán. México.
- Eliade, M., 1978. *Historia de las creencias y las ideas religiosas*. Ediciones Paidós. 66 p.
- EPA. 2007. Analytical Methods: Contaminants of Emerging Concern. Pharmaceuticals & Personal Care Products (PPCP's) Method Development. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- EPA. 2007a. Method 3550C. *Ultrasonic extraction*. Revision 3. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 17 p.
- EPA. 2007b. Method 3535^a. *Solid-phase extraction*. Revision 1. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 23 p.

- EPA. 2007c. Method 1699: *Pesticides in Water, Soil, Sediment, Biosolids, and Tissue* by HRGC/HRMS. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 96 p.
- EPA. 2008. *EPA's Report on the Environment (Roe) (2008 Final Report)*. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., EPA/600/R-07/045F (NTIS PB2008-112484).
- EPA. 2009. *Office of Water (4303T)*, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C. 20460 EPA-821-R-09-009
- Erskine, A.D., 1991: The effect of tidal fluctuation on a costal aquifer in the U.K., *Groundwater*, 29, 556-562 pp.
- Escobar-Briones, E., & Machaín, M.L., 2005. Cap. I. 11 in: Miloslavich, P., Klein, E. (eds) *Caribbean Marine Biodiversity: the known and the unknown*. Census of Marine Life e Instituto de Tecnología y Ciencias Marinas, Universidad Simón Bolívar, México.
- Escobar-Sánchez, J.E., Urrutia-Fucugauchi, J., 2010. Chicxulub crater post-impact hydrothermal activity-evidence from Paleocene carbonates in the Santa Elena borehole. *Geofísica Internacional*, 49, pp. 97-106.
- Escolero, O., Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, J., Cabrera, A., Alcocer, J., 2002. Development of a protection strategy of karst limestone aquifers: the Mérida Yucatan, Mexico case study. *Water. Resour. Manage.* 16, 351-367. doi:10.1023/A:1021967909293
- Escolero, O.A., Marin, L.E., Steinich, B., & Pacheco, J., 2000. *Delimitation of a hydrogeological reserve for a city within a karstic aquifer: The Merida, Yucatán example. Landscape Urban Plan.* 51(1), 53-62. doi:10.1016/S0169-2046(00)00096-7
- Escolero, O., Marín, L.E., Domínguez-Mariani, S., Torres-Onofre, S., 2007. Dynamic of the freshwater-saltwater interface in a karstic aquifer under extraordinary recharge action: the Merida Yucatan case study. *Environmental Geology*. 51(5), pp. 719-723.
- Escolero, O., Marín, L.E., Steinich, B., Pacheco, J.A., Molina-Maldonado, A., & Anzaldo, J.M., 2005. Geochemistry of the hydrogeological reserve of Mérida, Yucatán, Mexico. *Geofísica Internacional*, 44(3), 301-314.
- Espinosa-Cardena, J.M., Campos-Enríquez, J.O. & Unsworthc, M., 2016. Heat flow pattern at the Chicxulub impact crater, northern Yucatan, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 311, pp. 135-149.
- Esquivel-Moreno, M.D., 1991. Flora béntica. Cap. 4.1.2 in: Camarena-Luhrs T, Salazar-Vallejo SI (eds) *Estudios ecológicos preliminares de la zona sur de Quintana Roo*. CIQRO, Chetumal, pp. 85-91.
- Even, H.I., Carmi, I., Magaritz, M., Gerson, R., 1986. Timing the transport of water through the upper vadose zone in a karstic system above a cave in Israel. *Earth Surf. Processes and Landforms*. Vol. 11, pp. 181-191.
- Famiglini, G., Palma, P., Pierini, E., Truffelli, H., & Cappiello, A., 2008. Organochlorine Pesticides by LC-MS. *Anal. Chem.* 80, 3445-3449

- Farfán, H., Díaz, C., and Ramírez, R. 2010. *Algunas consideraciones sobre el desarrollo y distribución de las dolinas en el Parque Nacional Viñales, Pinar del Río, Cuba*: Mapping, no. 139, pp. 46-50.
- Fedick, S.L. (ed). 1996. *The managed mosaic: ancient Maya agriculture and resource use*. University of Utah Press, Salt Lake City.
- Ferris, J.G., 1952. *Cyclic fluctuations of water level as a basis for determining aquifer transmissibility*. Geological Survey Water Resources Division Ground Water Branch, Washington, D.C.
- Field, M.S. 1989. *The vulnerability of karst aquifers to chemical contamination. Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Ground-Water Hydrology, Tampa, FL*. Moore, J.E., Zaporozec, A.A., Csallany, S.C., Varney, T.C. Eds. American Institute of Hydrology, Gurr and Associates, Inc., Lakeland, FL., pp. 130-142.
- Finch, W.A., 1965. *The Karst Landscape of Yucatan*. Washington, D.C., National Research Council, 180 p.
- Flammarion, P., Noury, P., & Garric, J., 2002. The measurement of cholinesterase activities as a biomarker in chub (*Leuciscus cephalus*): The fish length should not be ignored. *Environmental pollution* (Barking, Essex: 1987). 120. 325-30. 10.1016/S0269-7491(02)00137-9.
- Florea, L., 2005. Using State-wide GIS data to identify the coincidence between sinkholes and geologic structure. *Geography/Geology Faculty Publications*. 67.
- Flores, G.J.S. & Espejel, I. 1994. *Tipos de Vegetación de la Península de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán. Etnoflora Yucatanense, Fascículo 3. 135 pp.
- Folan, J.W., 1968. *Cenote Sagrado de Chichén Itzá*. Traducción de Laura del Paso Gurría. Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- Folan, J.W., 1980. Chichen Itza: el Cenote Sagrado y Xibalba: Una nueva visión. *Boletín de la Escuela de Ciencias Antropológicas de la Universidad de Yucatán*. 44: 70-6.
- Ford, A., Nigh, R. 2009. Origins of the Maya forest garden: Maya resource management. *Journal of Ethnobiology*. 29 (2), pp. 213-236.
- Ford, D.C., & Williams, P.W. 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*: Chapman and Hall (eds). Unwin Hyman. 601 p. Londres.
- Ford, D.C. & Williams, P., 2007. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, John Wiley and Sons Ltd., 578 pp.
- Ford, D.C. y Williams, P.W. 2007. *Karst geomorphology and hydrology*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, U.K.
- Fraga, J., Khafash, L., y Córdoba, J., 2015. *Turismo y ocio lexiones sobre el Caribe Mexicano*. El Sauzal (Tenerife, España). PASOS RTCP. 215 pp.

- Fraga J., Sosa, P., Khafash, L., 2010. *La geometría del turismo y cambio climático en el Caribe mexicano*. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche.
- Fraga, J., 2000. Los Habitantes de la Zona Costera de Yucatán: Entre la Tradición y la Modernidad. En Evelia Rivera-Arriaga, Guillermo Villalobos, Isaac Azuz & Francisco Rosado (eds.) *El Manejo Costero en México*. Campeche: Universidad Autónoma de Campeche/SEMARNAT.
- Fragoso-Servón, P., Bautista, F., Frausto, O., & Pereira, A., 2014. Caracterización de las depresiones kársticas (forma, tamaño y densidad) a escala 1:50,000 y sus tipos de inundación en el Estado de Quintana Roo, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 31 (1), pp. 127-137.
- Freeze, R.A., Cherry, J.A. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J. 604 p.
- Freidel, D., Schele, L. and Parker, J. 1993. *Maya Cosmos: Two Thousand Years on the Shaman's Path*. William Morrow, New York.
- Frind, E.O., 1982. Seawater intrusion in continuous coastal aquifer-aquitard systems. *Adv. Water Resources*. V. 5, pp. 89-97.
- Frontana-Uribe, S.C., & Solís-Weiss, V., 2011. First records of polychaetous annelids from Cenote Aerolito (sinkhole and anchialine cave) in Cozumel Island, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 73, pp. 1-10.
- Furtos, N.C., 1936. On the Ostracoda from the cenotes of Yucatán and vicinity. *Publications of the Carnegie Institution of Washington*. 457, pp. 89-115.
- Furze, B., 1996. *Culture, conservation and biodiversity: the social dimension of linking local level development and conservation through protected areas*. Chichester, John Wiley & Sons.
- Gabriel, J.J., Reinhardt, E.G. & Peros, M.C. et al., 2009. Palaeoenvironmental evolution of Cenote Aktun Ha (Carwash) on the Yucatan Peninsula, Mexico and its response to Holocene sea-level rise. *Journal of Paleolimnology*. 42, pp. 199-213.
- Galgani, F. y Bocquené, G. 1990. *In vitro* Inhibition of acetylcholinesterase from four marine species by organophosphates and carbamates. *Bull Environ Contam Toxicol*. 45:243-249.
- Gallardo-Torres, A., Badillo-Alemán, M., Arceo-Carranza, D., Chiappa-Carrara, X., 2017. *Guía rápida de identificación: Peces de cenote y ciénagas costeras de Yucatán*. PAPIME PE206516. Unidad Académica Yucatán. UNAM. Tríptico.
- Galve, J.P., Castañeda, C., Gutiérrez, F. & Herrera, G. 2015. Assessing sinkhole activity in the Ebro Valley mantled evaporite karst using advanced DInSAR. *Geomorphology*. 229, pp. 30-44.
- Galve, J., Remondo, J., Bonachea, J., Lucha, P. & Cendrero, A., 2009. Evaluating and comparing methods of sinkhole susceptibility mapping in the Ebro Valley evaporite karst (NE Spain). *Geomorphology*. 111. 160-172. 10.1016/j.geomorph.2009.04.017.

- Gao, Y., Zhou, W. 2008. Advances and challenges of GIS and DBMS applications in karst: *Environmental Geology*, 54, 901-904.
- Gao, Y., 2008. Spatial operations in a GIS-based karst feature database. *Environmental Geology*. 54. 1017-1027. 10.1007/s00254-007-0896-2.
- Gaona, S., Gordillo, T., Villasuso, M., 1980. *Cenotes. Karst característico: Mecanismos de Formación*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología. Revista, Vol. 4, No. 1, pp. 32-36.
- Gaona, S., Villasuso, M., Pacheco, J., Cabrera, A., Trejo, J., Gordillo, T., Tamayo, C., Coronado, V., Durazo, J., Perry, E., 1985. Hidrogeoquímica de Yucatán 1: Perfiles hidrogeoquímicos profundos en algunos lugares del acuífero del noroeste de la Península de Yucatán. *Boletín. Instituto de Geofísica*. UNAM. México.
- García, B., 1986. Conceptos básicos para el estudio de sistemas complejos. En: *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. Enrique Leff (Coord.). Siglo XXI Editores. México.
- García de Fuentes, A. 1979. *Cancún: turismo y subdesarrollo regional*. México: UNAM.
- García, E. 1990. Carta de climas (1:4×106). *Atlas Nacional de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- García, G.G., Graniel, E.C., 2010. Geología. En: *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. Durán, R., Méndez, M., (Edits). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.
- García-Gil, G., Graniel-Castro, E. 2009. Geología. En: *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. SEDUMA pp. 4-6.
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. Instituto de Geografía, UNAM. México.
- Garza, S. y Kurjack, E., 1980. *Atlas Arqueológico del Estado de Yucatán*. 2 Tomos. Centro Regional del Sureste-INAH. México.
- Veni, G. 1992. Man-Made and Pseudo-Karst Caves: The Implications of Subsurface Features within Maya Centers. *Geoarchaeology: An International Journal*, Vol. 7, No. 2, pp.149-167.
- Gertsch, W.J., 1977. Report on cavernicole and epigeal spiders from the Yucatan Peninsula. *Association for Mexican Cave Studies Bulletin*. 6, pp. 103-131.
- Gill, R.B., 2000. *The Great Maya Droughts: Water, Life, and Death*. University of New Mexico Press, Albuquerque.
- Gmitro, D.A., 1986. *The Interactions of Water with Carbonate Rock in Yucatan, Mexico*. M.S. Thesis. Northern Illinois University. 111 p.
- Godfrey, E., Woessner W. & Benotti M. 2007. *Pharmaceuticals in On-site sewage effluent and ground water, Western Montana*. 45(3):263-271.

- Goeppert, N., Goldscheider, N., & Scholz, H., 2011. Karst geomorphology of carbonatic conglomerates in the Folded Molasse zone of the Northern Alps (Austria/Germany). *Geomorphology*, 130, 289-298. 10.1016/j.geomorph.2011.04.011.
- Goff, J.A., Gulick, S.P.S., Pérez-Cruz, L., Stewart, H.A., Davis, M., Duncan, D., Saustrup, S., Sansford, J. & Urrutia-Fucugauchi, J., 2016. *Solution pans and linear sand bedforms on the bare-rock limestone shelf of the Campeche Bank, Yucatan peninsula, Mexico*. *Continental Shelf Research*, 177, 57-66.
- Goksøyr, A., Förlin, L., 1992. The cytochrome P450 system in fish, aquatic toxicology and environmental monitoring. *Aquat Toxicol.* 22, 287-312
- Gold-Bouchot, G., Zapata-Pérez, O., Rodríguez-Fuentes, G., Ceja-Moreno, V., Del Río-García, M., Chan-Cocom, E., 2006. Biomarkers and pollutants in the Nile Tilapia, *Oreochromis niloticus*, in four lakes from San Miguel, Chiapas, Mexico. *Int. J. Environment and Pollution*, 26(1-3), 129-141.
- Gold-Bouchot, G., 1991. *A Stable Isotope Study of three Coastal Ecosystems in Yucatan, Mexico*. PhD. Dissertation. CINVESTAV-IPN, Unidad Mérida, México.
- Gondwe, B., Lerer, S., Stisen, S., Marín, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merediz-Alonso, G., Bauer-Gottwein, P., 2010. Hydrogeology of the south-eastern Yucatan Peninsula: New insights from water level measurements, geochemistry, geophysics and remote sensing. *Journal of Hydrology*, 389, 1-17.
- González, R.A. 1984. *Correlación de muestras de roca en pozos de la ciudad de Mérida*. Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Autónoma de Yucatán. Mérida, Yucatán, México.
- González-Licón, E. 1986. *Los Mayas de la Gruta de Loltún, Yucatán a través de sus materiales arqueológicos*. Colección Científica Instituto Nacional de Antropología e Historia, México.
- González, R.A. 1992. *Evolution of groundwater contamination in the Yucatan karstic aquifer*. Tesis de maestría en ciencias, Universidad de Waterloo, Ontario, Canada. p.148.
- Good, B.J., 2003. [1994] *Medicina, Racionalidad y Experiencia*, Barcelona, Bellaterra. Illich Ivan, 1976, Némesis Médica, Madrid.
- Gracia-Prieto, F. 1991. Criterios de clasificación morfométrica de campos de dolinas. *Cuaternario y Geomorfología*. 5. 65-76.
- Graniel, C.E., Morris, L.B., Carrillo-Rivera, J.J., 1999. Effects of urbanization on groundwater resources of Mérida, Yucatán, México. *Environmental Geology*. 37(4):303-312.
- Graniel, C.E., Vera, M.I., González, H.L., 2004. Dinámica de la interfase salina y calidad del agua en la costa nororiental de Yucatán. *Ingeniería*. 8(3): 15-25.
- Graniel, E.C., 2010. Hidrología. En: *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. Durán R. y M. Méndez (Editores). CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA.

- Graniel, E.C., Cardona, A. y Carrillo-Rivera, J., 1999. Hidrogeoquímica en el acuífero calcáreo de Mérida, Yucatán: elementos traza. *Ingeniería Hidráulica en México*. Vol. XIV, Núm. 3, pp. 19-28.
- Grimaldi, S., Nardi, F., Di Benedetto, F., Istanbuluoglu, E., Bras, R.L., 2007. A physically-based method for removing pits in digital elevation models. *Advances in Water Resources*. 30 (10), pp. 2151-2158.
- Guillermo-Prieto, A. 2013. *Secretos del mundo sobrenatural Maya*. National Geographic. 33 (2), pp. 2-25.
- Gulick, S.P.S., Christeson, G.L., Barton, P.J., Grieve, R.A.F., Morgan, J.V. & Urrutia-Fucugauchi, J., 2013. Geophysical characterization of the Chicxulub impact crater. *Reviews of Geophysics*. 51 (1), pp. 31-52. doi:8755-1209/13/10.1002/rog.20007
- Günther, A., 1864. Report of a collection of fishes made by Messrs. Dow, Godman and Salvin in Guatemala. Part first. *Proc. Zool. Soc. London*, 1864(1):144-154.
- Gutiérrez F., Galve J.P., Lucha, P., Castañeda, C., Bonachea, J., & Guerrero, J. 2011. Integrating geomorphological mapping, trenching, InSAR and GPR for the identification and characterization of sinkholes: a review and application in the mantled evaporite karst of the Ebro Valley (NE Spain). *Geomorphology*. 134 (1-2), pp. 144-156.
- Gutiérrez-Báez, C. 2006. Lista de especies de plantas acuáticas vasculares de la Península de Yucatán, México. *Polibotánica* 21:75-87.
- Gutiérrez-Elorza, M. 2008. *Geomorfología*. Pearson Prentice Hall. 898 pp.
- Gutiérrez-Santolalla, F., Acosta, E., Ríos, S., Guerrero, J., Lucha, P. 2005. Geomorphology and geochronology of sackung features (uphill-facing scarps) in the Central Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 69, 298-314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.01.012>
- Gutiérrez, F., Parise, M., De Waele, J., & Jourde H., 2014. A review on natural and human induced geohazards and impacts in karst. *Earth Science Reviews*. 138, pp. 61-88.
- Hailong, L. and Jiao, J., 2001. Tide-induced groundwater fluctuation in a coastal leaky confined aquifer system extending under the sea. *Water Resources Research*, vol. 37, no. 5, pages 1165-1171, may 2001.
- Hall, F.G., 1936. Physical and chemical survey of cenotes of Yucatan. *Carnegie Institution of Washington Publications*, 457: 5-16.
- Hausman, H., 2009. *Responsible Development in Tulum, México: Considering Water Quality and Subaqueous Cave Locations*. Masters project submitted in partial fulfillment of the requirements for the Master of Environmental Management degree in the Nicholas School of the Environment of Duke University, 55 p.
- Heckmann, T., Schwanghart, W., Phillips, J.D., 2015. Graph theory-recent developments of its application in geomorphology. *Geomorphology*. 243, pp. 130-146.

- Henriques, M. & Brilha, J., 2017. *UNESCO Global Geoparks: A strategy towards global understanding and sustainability*. *Episodes*. 40. 349. 10.18814/epiiugs/2017/v40i4/017036.
- Herbario CICY. 2010. *Flora de la Península de Yucatán*. Centro de Investigaciones Científicas de Yucatán. Recuperado el 21 de septiembre de 2016 en: <http://www.cicy.mx/sitios/flora%20digital/>
- Hernández-Terrones, L., Rebolledo-Vieyra, M., Merino-Ibarra, M., Soto, M., Le-Cossec, A., & Monroy-Ríos, E. 2011. *Groundwater Pollution in a Karstic Region (NE Yucatan): Baseline Nutrient Content and Flux to Coastal Ecosystems*. *Water, Air, & Soil Pollution*. 28, pp. 517-528.
- Herrera-Silveira, J.A. & Morales-Ojeda, S.M. 2009. Evaluation of the health status of a coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin*. 59, pp. 72-86.
- Herrera-Silveira, J., & Morales-Ojeda, S., 2010. Lagunas costeras En: *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. SEDUMA pp. 24-26.
- Herrera-Silveira, J.A., Comin-Sebastian, F., Hamilton, P., Sandoval-Jiménez, A. Medina-Gómez, I., Álvarez-Góngora, C., Merino, F., Díaz-Arce, V., Aranda-Cirecol, N. & Trejo-Peña, J., 2002. *Biodiversidad fitoplanctónica de cenotes: Patrones espaciales y temporales*. Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados Mérida. Informe final SNIB-CONABIO proyecto No. S004. México.
- Herrera-Silveira, J.A., Camacho, A.R., Pech, E., Pech, M., Ramírez, R.J., & Teutli, H.C., 2016. Dinámica del carbono (almacenes y flujos) en manglares de México. *Terra Latinoamericana*. 34, pp. 61-72.
- Herrera-Silveira, J.A., Díaz-Arce, V., & Comín, F.A. 2000. Limnological characteristics of two types of cenotes of Yucatan. *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*. 27, pp. 3579-3582.
- Herrera-Silveira, J.A. 1994. Nutrients from underground discharges in a coastal lagoon (Celestún, Yucatán, México). *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie*. 25, pp. 1398-1403.
- Herrera-Silveira, J.A., Ramírez, J. & Zaldívar, A. 1988. Overview and characterization of the hydrology and primary producer communities of selected coastal lagoons of Yucatan, Mexico. *Aquatic Ecosystems and Health Management*, 1 (3-4), 353-372.
- Herrera-Silveira, J.A. 1993. *Ecología de los productores primarios en la laguna de Celestún, México. Patrones de variación espacial y temporal*. PhD thesis. Universitat de Barcelona, Spain. 225 p.
- Herrera-Silveira, J.A. 2006. Lagunas costeras de Yucatán, México: Investigación, diagnóstico y manejo, *Ecotropicos* 19 (2), pp. 94-108.
- Heyden, D. 1976. Los ritos de paso en las cuevas. *Boletín del Instituto Nacional de Antropología e Historia*, 19: 17-26.

- Heyden, D. 1998. México, orígenes de un símbolo. INAH, México.
- Hildebrand, A., Penfield, G., Kring, D., Pilkington, M., Camargo, A., Jacobsen, S.B., & Boynton, W. 1991. Chicxulub crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatan peninsula, Mexico. *Geology*, 19, pp. 867-871.
- Hildebrand, A.R., Pilkington, M., Ortiz-Alemán, C., Chávez, R.E., Urrutia-Fucugauchi, J., Connors, M., Graniel-Castro, E., Camara-Zi, A., Halpenny, J.F. & Niehaus, D. 1998. Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic data. In: *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects*, Grady, R. et al. (Eds.), *Geological Society Special Publication*, 140, 155-176.
- Hildebrand, A.R., Penfield, G.T., Kring, D.A., Pilkington, M., Camargo, Z.A., Jacobsen, S.B. y Boynton, W.V. 1991. Chicxulub Crater: A possible Cretaceous/Tertiary boundary impact crater on the Yucatán Peninsula, Mexico. *Geology*, V. 19, September, pp 867-871.
- Hildebrand, A.R., Pilkington, M., Connors, M., Ortiz, A.C., y Chávez, R.E. 1995. Size and structure of the Chicxulub crater revealed by horizontal gravity gradients and cenotes. *Nature*, Vol. 376, August, pp. 415-417.
- Hodell, D.A., Curtis, J.H. & Brenner, M., 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. *Nature*. 375, pp. 391-394.
- Hodge, G., 2014. *Most Complete Ice Age Skeleton Helps Solve Mystery of First Americans*. National Geographic Society Washington, D.C. U.S.A.
- Hoffmann, A., Palacios-Vargas, J.G., & Morales-Malacara, J.B., 1986. *Manual de Bioespeleología (con nuevas aportaciones de Morelos y Guerrero, México)*. Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Holsinger, J.R., 1992. Two new species of the subterranean amphipod genus *Bahadzia* (Hadziidae) from the Yucatan Peninsula region of southern Mexico, with an analysis of phylogeny and biogeography of the genus. *Stygologia*. 7, pp. 85-105.
- Hoogesteijn-Reul, A.L., Febles-Patrón, J.L., Nava-Galindo, V.A., 2015. La contaminación fecal en cenotes de interés turístico y recreacional del estado de Yucatán. *Ingeniería*, 19 (3): 169-175.
- Hornborg, A. 2001. La ecología como semiótica. Esbozo de un paradigma contextualista para la ecología humana. En Descola, P. y Pálsson, G. (coords.). *Naturaleza y Sociedad. Perspectivas antropológicas*. Ed. Siglo XXI. México. pp. 60-79.
- Hose, T., 2000., "Geoturismo" europeo. Interpretación geológica y promoción de la conservación geológica para turistas. En: Baretino, D., Vallejo, M. y Gallego, E. (Eds.). *Towards the Balanced Management and conservation of the geological Heritage in the New Millenium*, 137-160. Sociedad Geológica de España, Instituto Tecnológico Geominero de España y European Association for the Conservation of the Geological Heritage. Madrid.
- Hose, T., 2006. Geotourism and Interpretation, in Dowling, R. & Newsome, D. (eds.) *Geotourism, Sustainability, Impacts and Opportunities* (pp. 221-241). Elsevier. Oxford, Reino Unido.

- Hose, T.A. 1995. "Selling the story of Britain's stone". *Environmental Interpretation* 10(2): 16-17.
- Howard, J., Hoyt, S., Isensee, K., Telszewski, M. & Pidgeon, E. (eds.). 2014. *Coastal Blue Carbon: Methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrasses*. Conservation International, Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, International Union for Conservation of Nature. Arlington, Virginia, USA.
- Huang, W., Deng, C.J., Day, M., 2014. Differentiating tower karst (fenglin) and cockpit karst (fengcong) using DEM contour, slope, and centroid. *Environmental Earth Sciences*. 72 (2), pp. 407-416.
- Huang, H. 2007. Geomorphologic investigations on karst terrain: a GIS-assisted case study on the island of Barbados: Montral, Québec, McGill University, Department of Bioresource Engineering, tesis de Maestría en Ciencias, 95 pp.
- Hubbs, C.L. 1936. Fishes of the Yucatan Peninsula. *Carnegie Institution of Washington Publication*. 457, pp. 157-287.
- Hung, L., Dinh, N. & Batelaan, O. & Vu, T. & Lagrou, D., 2002. *Remote sensing and GIS-based analysis of cave development in the Suoimuoi catchment* (Son La-NW Vietnam).
- IARC. 2017. International Agency for Research of Cancer. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Human, World Health Organization*. Recuperado de <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>
- Iliffe, T.M., 1992. An annotated list of the troglobitic anchialine and freshwater fauna of Quintana Roo. In Navarro, D. & E. Suárez-Morales (eds.), *Diversidad Biológica en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Quintana Roo, México*. Vol. II. CIQRO/SEDESOL, Chetumal: 197-217.
- INEGI. 1991. *Datos básicos de la geografía de México*. México: INEGI.
- INEGI. 2002. *Estudio Hidrológico del Estado de Yucatán*. México: INEGI.
- INEGI. 2005. *Anuario estadístico del estado de Quintana Roo*, 1st Ed. Aguascalientes, México. vol XI, 42.
- INEGI. 2008. *Características edafológicas, fisiográficas, climáticas e hidrológicas de México*. Recuperado de http://www.inegi.org.mx/inegi/spc/doc/INTERNET/1-GEOGRAFIADEMEXICO/MANUAL_CARAC_EDA_FIS_VS_ENERO_29_2008.pdf
- INEGI. 2009. *Aspectos geográficos de Yucatán*. México: INEGI.
- INEGI. 2010. *Continuo Nacional de la Carta Geológica del Estado de Yucatán*. Serie 1. INEGI Yucatán, Mexico.
- INEGI. 2014. *Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo*. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. 381 pp.
- INEGI. 2016. *Estudio de información integrada del acuífero cárstico de la Península de Yucatán*. ISBN 978-607-530-000-9. México: INEGI. 132 p.

- INEGI. 2018. Información por entidad federativa. México: INEGI.
- Isphording, W.C. 1975. The physical geology of Yucatan. *Transactions. Gulf Coast Association of Geological Societies*. Vol. 25. p. 231-262.
- Iturralde-Vinent, M.A., 1994. Cuban Geology: A new plate tectonic synthesis: *Journal of Petroleum Geology*. 17 (1), 39-70.
- IUPAC. 2003. International Union of Pure and Applied Chemistry. Regulatory limits for pesticide residues in water. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 75, No. 8, pp. 1123-1155, 2003.
- Jackson, S. 2012. Designing an Optimal Pit Removal Tool for Digital Elevation Models. GIS in Water Resources. CRWR. 11 pp.
- Jaubert, J., Verheyden, S., Genty, D. *et al.* 2016. Early Neanderthal constructions deep in Bruniquel Cave in southwestern France. *Nature* 534, 111-114 (2016). <https://doi.org/10.1038/nature18291>
- Jennings, J.N., 1985. *Karst Geomorphology*, 2nd ed., Blackwell, 304 pp.
- Jenson, S., Domingue, J.O., 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. 54 (11), pp. 1593-1600.
- Jiménez-Martínez, A. de J. 2005. *Desarrollo turístico y sustentabilidad: el caso de México*. Universidad del Caribe, México.
- Jiménez, A. y Sosa, P., 2010. *El turismo de segundas residencias en Cancún y la Riviera Maya*. México: UAEM, Universidad del Caribe, Plaza y Valdés.
- Jung-Ho, K., & Yoon-Seok, C., 2011. Organochlorine pesticides in human serum. En *Pesticides Strategies for Pesticides Analysis*; Stoytcheva, M., Ed. 2011. InTech: Rijeka, Croatia.
- Kantún, C.A., Herrera-Silveira, J.A. & Árcega-Cabrera, F., 2018a. Influence of Coastal Submarine Groundwater Discharge on Seagrass Communities in a Subtropical Karst Environment. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 2018 Jan;100(1):176-183. doi: 10.1007/s00128-017-2259-3. Epub 2018 Jan 3.
- Kantún, C., Árcega-Cabrera, F., Derrien, M., Noreña-Barroso, E. & Herrera-Silveira, J. 2018b. Submerged Groudwater Discharges as Source of Fecal Material in Protected Karstic Coastal Areas. *Geofluids*. Volume 2018 |Article ID 9736260 | <https://doi.org/10.1155/2018/9736260>
- Karoutsou, E., Karoutsos, P. & Karoutsos, D., 2017. Endocrine Disruptors and Carcinogenesis. *Arch Can Res*. 2017, 5: 1. doi: 10.21767/2254-6081.1000131
- Kasperson, J.X., Kasperson, R.E., 2005. *The Social Contours of Risk*. London y Sterling, Va.: Earthscan.
- Kaufman, L. & Rouseeuw, P.J., 1990. *Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc. 342 pp.

- Kepecs, S. & Boucher, S., 1996. The Pre-Hispanic cultivation of rejolladas and stone-lands: new evidence from northeast Yucatan. En: Fedic, S. (ed.) *The managed mosaic: ancient Maya agriculture and resource use*. University of Utah Press, Salt Lake City, pp. 69-91.
- Khafash, L. & Fraga, J., 2012. *Turismo y responsabilidad social empresarial. Estudio de caso en el Caribe mexicano*. Recuperado en <https://www.mda.cinvestav.mx/FTP/EcologiaHumana/profesores/Fraga/KhafashyFraga2012.pdf>
- Khafash L. & Fraga J. 2011. Entornos naturales y mercado turístico en la Riviera Maya: Experiencias Xcaret y patrimonialización desde entramados narrativos. En: Prats L, Santana A (Coords.), *Turismo y patrimonio, entramados narrativos*, Colección Pasos Edita, No. 5. Pasos, Tenerife, pp. 145-168.
- Khafash, L., 2009. *Xel-Há: imagen y producto del mercado ecoturístico en la Riviera Maya*. (Documento de trabajo de investigación para obtener el DEA): Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Khafash, L. 2015. *Disneyización, parques temáticos y cultura corporativa en el capitalismo terciario: Experiencias Xcaret, Riviera Maya (México)*: tesis de doctorado. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Análisis Geográfico Regional y Geografía Física. 539 páginas.
- Kime, D.E., Nash, J.P, Scott, A.P. 1999. Vitellogenesis as a biomarker of reproductive disruption by xenobiotics. *Aquaculture*, No. 177, 345-352.
- Kinsland, G.L., Pope, K.O., Carador, M.H., Cooper, G.R., Cowan, D.R., Kobrick, M. & Sánchez, G., 2005. Topography over the Chicxulub impact crater from shuttle radar topography mission data. *Geological Society of America*, Sp Pap., 384, 141-146.
- Kinsland, G., Hurtado, M., & Pope, K., 2000. Detection of groundwater conduits in limestones with gravity surveys: Data from the area of the Chicxulub impact crater, Yucatan peninsula, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 27, 1223-1226.
- Kleinman, A., 1978. Concept and Model for the comparison of medical Systems as cultural Systems, *Soc. Sc. and Med.* Vol. 12, pp. 85-93.
- Kleinman, A.M., 1980. *Patients and Healers in the Context of Culture: An Exploration of the Borderland between Anthropology, Medicine, and Psychiatry*. Berkeley: University of California Press.
- Kleinman, A.M. 1988. The Illness Narratives: Suffering, Healing and the Human Condition. New York: Basic Books. Laín Entralgo, P. (1960): "La enfermedad como experiencia", *Revista de Occidente*, "Ocio y trabajo": 81-128
- Knapp, B.L. 1997. The Popol Vuh: primordial mother participates in the creation. *Confluencia*. 12 (2), pp.31-48.
- Kohout, F.A., 1961. Fluctuations of ground water levels caused by dispersion of salts. *Journal of Geophysical Research*. Vol. 66, No. 8, August, pp. 2429-2434.

- Kolpin, D.W., Thurman, E.M. & Linhart, S.M. 2000. Finding minimal herbicide concentrations in ground water? Try looking for their degradates. *Science of the Total Environment*. 248:115-122.
- Lammason, R.L., Mohideen, M.A., Mest, J.R., Wong, A.C., Norton, H.L., Aros, M.C., Jurynech, M.J., Mao, X., Humphreville, V.R., Humbert, J.E., Sinha, S., Moore, J.L., Jagadeeswaran, P., Zhao, W., Ning, G., Makalowska, I., McKeigue, P.M., O'donnell, D., Kittles, R., Parra, E.J., Mangini, N.J., Grunwald, D.J., Shriver, M.D., Canfield, V.A., Cheng, K.C., 2005. SLC24A5, a putative cation exchanger, affects pigmentation in zebrafish and humans. *Science*, 310:1782–178
- Landa, D., 1994. Relación de las cosas de Yucatán. En: León-Cázares M. C. (ed) *Estudios preliminares y revisión de textos*. CONACULTA, México. pp. 11-79.
- Landa, D., 1982. *Relación de las cosas de Yucatán [1566]*. México: Porrúa.
- Larena, W.Y., 2013. *Disponibilidad de agua en la zona de captación Mérida I y adecuación de un índice de calidad para aguas subterráneas*. Tesis de Maestría en Ingeniería, Opción Ambiental. Facultad de Ingeniería de la UADY.
- Laurelli, E., Pirez, P. y Castañares, E., 1990. Incorporación de la dimensión ambiental en una administración sectorizada. In: *Medio Ambiente y Desarrollo en México*, vol. 2 Coord. Enrique Leff. Ed. CIIH-UNAM y Miguel Ángel Porrúa.
- Leal-Bautista, R.M., Hernández-Zárate, G., Jaime, N., Cuevas, G., Velázquez-Oliman, G., 2011. Pathogens and pharmaceutical pollutants as indicators of contamination at the northeastern aquifer of Quintana Roo. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13:211-219.
- Leff, E. 1986. *Los problemas del conocimiento y la perspectiva ambiental del desarrollo*. Ed. Siglo XXI. México.
- Lefticariu, M., Perry, E.C., Ward, W.C., & Lefticariu, L., 2006. Post-Chicxulub depositional and diagenetic history of the northwestern Yucatan Peninsula, Mexico. *Sedimentary Geology*. 183 (1–2), pp. 51–69.
- Lesser, J.M., Weidie, A.E., 1988. Region 25, Yucatan Peninsula, Chapter 28, *The Geology of North America*. Vol. O-2, Hydrogeology. The Geological Society of America. pp 237-241.
- Lewis-Williams, D. 2002. *The mind in the cave: consciousness and the origins of art*. London: Thames and Hudson. 320 pp.
- Ley de Aguas Nacionales. 1992. México.
- Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán. 2010. México.
- Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. 1988. México.
- Ley Orgánica de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado del Estado de Yucatán, 1982, México.

- Li, S., MacMillan, R.A., Lobb, D.A., McConkey, B.G., Moulin, A., & Fraser, W.R., 2011. LiDAR DEM error analyses and topographic depression identification in a hummocky landscape in the prairie region of Canada. *Geomorphology*. 129 (3-4), pp. 263-275.
- Lindsay, J.B., & Creed, I.F., 2005. Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minim impact approach. *Hydrological Processes*. 19, pp. 3113-3126.
- Lindsay, J.B., 2016. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models, *Hydrological Processes*. 30 (6), pp. 846-857.
- Lindsey, B.D., Katz, B.G., Berndt, M.P., Ardis, A.F., Skach, K.A. 2010. Relations between sinkhole density and anthropogenic contaminants in selected carbonate aquifers in the eastern United States. *Environmental Earth Sciences*, 60(5):1073-1090. Doi: 10.1007/s12665-009-0252-9
- Liu, J., & Schelar, E., 2012. Pesticide exposure and child neurodevelopment: summary and implications. *Workplace Health & Safety*. 2012 May;60(5):235-42; quiz 243. DOI: 10.1177/216507991206000507.
- Lloyd, S.P., 1982. Least Squares Quantization in PCM. *IEEE Transactions on Information Theory*. 28, pp. 129-137.
- Logan, B.W., Harding, J.L., Ahr, W.M., Williams, J.D., Snead, R.G., 1969. *Late quaternary carbonate sediments of Yucatan shelf. Mexico carbonate sediments and reefs, Yucatan shelf, Mexico*. A.A.P.G., 1969, Memoir 11, Oklahoma, USA, pp. 1-128.
- Long, M., Paul-Pont, I., Hégaret, H., Moriceau, B., Lambert, C., Huvet, A., Soudant, P., 2017. Interactions between polystyrene microplastics and marine phytoplankton lead to species-specific hetero-aggregation, *Environ. Pollut.*, 228 (2017), pp. 454-463, doi: 10.1016/j.envpol.2017.05.047
- López Austin, A., 1996. *Los mitos del Tlacuache*. UNAM. Instituto de Investigaciones Antropológicas. México.
- López Austin, A. y Millones, L., 2008. *Dioses del Norte, Dioses del Sur. Religiones y Cosmovisión en Mesoamérica y los Andes*. Editorial ERA. México.
- López Austin, A., 1998. Los ritos. Un juego de definiciones. *Arqueología Mexicana*. 34:4-17.
- López Austin, A., 1999. *Tamoanchan y Tlalocan. Sección de Obras de Antropología*. Fondo de Cultura Económica, México.
- López Austin, A., 2004. La Magia y la Adivinación en la Tradición Mesoamericana. *Arqueología Mexicana*. Vol. XII, número 69,. 20-29.
- López Austin, A., 2006. Mitos e Iconos de la Ruptura del Eje Cósmico: Un Glifo Toponímico de las Piedras de Tizoc y del Ex Arzobispado. *Anales del Instituto de Investigaciones Estéticas*. Numero 89: 93-134, UNAM, México.

- López Austin, A., 2008. Los Mexicas ante el Cosmos. *Arqueología Mexicana*. Vol. XVI número 91:24-35.
- López-Geta, J.A., Fornés-Azcoiti, J.M., Ramos-González, G., Villarroya, G., 2009. *Las aguas subterráneas, un recurso natural del subsuelo*, 4a edición; Instituto Geológico y Minero de España; Madrid. 99 p.
- López-Portillo, J., Ezcurra, E. & Maass, J.M., 1989. Los petenes de Sian ka'an, Quintana Roo y su relación con gradientes de presión hídrica. *Acta Botánica Mexicana*. 5, pp. 19-29.
- López-Ramos, E., 1983. *Geología de México*. Vol. 3. Ciudad de México, México. 453 p.
- López-Ramos, E., 1973. Estudio Geológico de la Península de Yucatán: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. 25 (1-3), pp. 23-75.
- López-Ramos, E., 1975. *Geological summary of the Yucatan Peninsula*. En: A.E.M. Nairn y F.G. Stehli Editores. *The Ocean Basins and Margins, V. 3, The Gulf of Mexico and Caribbean*. Plenum, New York, pp. 257-282.
- Loucks, R.G. & Handford, C.R., 1992. Origin and recognition of fractures, breccias and sediments fills in paleocave-reservoir networks. En: M.P. Candelaria & C.L. Reed (eds), *Paleokarst, karst related diagenesis and reservoir development: examples from Ordovician-Devonian age strata of west Texas and the mid-continent*. Permian Basin Section. *Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists Publication*. 92-33, 31-44 pp.
- Loucks, R.G., 1999. Paleocave carbonate reservoirs: origins, burial-depth modifications, spatial complexity, and reservoir implications: *American Association of Petroleum Geologists, Bulletin*, 83, 1795-1834.
- Lugo-Hubp, J., Aceves, J., & Espinosa, R., 1992. Rasgos geomorfológicos mayores de la península de Yucatán. *Revista Instituto de Geología*, 10, 143-150.
- Lugo, J., 1999. El relieve de la Península de Yucatán. En: *Atlas de Procesos territoriales del estado de Yucatán*. Universidad Autónoma de Yucatán.
- Lupton, D., 1999. Risk and Sociocultural Theory: New Directions and Perspectives. DOI: 10.1017/CB09780511520778.
- Lyew-Ayee, P., Viles, H.A. & Tucker, G., 2007. The use of GIS-based digital morphometric techniques in the study of cockpit karst. *Earth Surface Processes and Landforms*. 32. 165-179. 10.1002/esp.1399.
- Macías, C., Pérez, R. (Comps). 2009. *Cancún. Los avatares de una marca turística global*. Universidad de Quintana Roo y Conacyt, Chetumal.
- MacLeod, B., y Puleston, D.E., 1978. *Pathways into Darkness: The Search for the Road to Xibalbá*. Tercera Mesa Redonda de Palenque, Vol 4, ed. M.G. Robertson and D.C. Jeffers, pp. 71-77. Hearld Peters, Monterey, CA.

- MacSwiney, G.M.C., Bolívar-Cimé, B., Clarke, F.M. & Racey, P.A., 2009. Insectivorous bat activity at cenotes in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Acta Chiropterologica* .11, pp. 139-147.
- MacSwiney, G.M.C., Vilchis, P., Clarke, F.M., & Racey, P.A. 2007. The importance of cenotes in conserving bat assemblages in the Yucatan, Mexico. *Biological Conservation*. 136, pp. 499-509.
- Marín, L., Steinich, B., Pacheco, J., & Escolero, O., 2000. Hydrogeology of a Contaminated Sole-Source Karst Aquifer, Merida, Yucatán, México. *Geofísica Internacional*. 39(4):359-365.
- Marín, L.E., & Perry, E.C. 1994. The hydrogeology and contamination potential of Northwestern Yucatán, México. *Geofísica Internacional*, 33 (4), 619-623.
- Marín, L.E. 1990. Field Investigations and Numerical Simulation of Groundwater Flow in the Karstic Aquifer of Northwestern Yucatan, Mexico. PhD dissertation, Northern Illinois University, Dekalb, Illinois, 183 pp.
- Marín, L.E., 1994. *Informe final sobre las perforaciones en Yucatán. Reporte Técnico*, IGF-UNAM.
- Marín, L.E., Perry, E.C., Essaid, H., Steinich, B., 2004, Hydrogeological investigations and numerical simulation of groundwater flow in the karstic aquifer of northwestern Yucatan, Mexico, en Cheng, A.H.D., Ouazar, D. (eds.) *Coastal aquifer management: monitoring, modeling and case studies*. Boca Raton, FL., Lewis Publishers, CRC press, 257-277.
- Marín, L.E., Pope, K.O., Duller, C.E., Booth, C.J., Villasuso, M., 1989. Hurricane Gilbert: Its effects on the aquifer in Northwestern Yucatan, Mexico. *Selected Papers on Hydrogeology from the 28th International Geologic Congress, Washington, D.C.* International Association of Hydrogeologists. Simpson E.S., Sharp Jr J.M., Eds. Vol. 1, pp. 111-128.
- Marshall, R., 1936. Hydracarina from Yucatan. *Carnegie Institution of Washington Publication*. 457, pp. 133-137.
- Martínez-Tabche, L., Ramírez-Mora, B., German-Faz, C., Galar-Castellan, I., Madrigal-Ortiz, M., Ulloa-González, V. y Orozco-Flores, M., 1997. Toxic effect of sodium dodecylbenzenesulfonate, lead, petroleum and their mixtures on the activity of acetylcholinesterase of *Moina macrocopa* in vitro. *Environ Toxicol Water Qual*. 12:211-215.
- Martz, L.W. & Garbrecht, J., 1998. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. *Hydrological processes*. 12, pp. 843-855.
- Maslin, T.P., 1963. Notes on a collection of herpetozoa from the Yucatan Peninsula of Mexico. University of Colorado Studies, *Series in Biology*. 9, pp. 1-20.
- Mathur, V., John, P.J., Soni, I., & Bhatnagar, P., 2008. Blood levels of organochlorine pesticide residues and risk of reproductive tract cancer among women from Jaipur, India. *Adv. Exp. Med. Biol.* 617, 387-394.
- Mazzulo, S.J. y Mazzulo, L.J., 1992. Paleokarst and karst associated hydrocarbon reservoir in the Fusselman Formation, west Texas, Permian basin. En: M.P. Candelaria and C.L. Reed (Eds.). *Paleokarst, karst related diagenesis and reservoir development: examples from*

Ordovician-Devonian age strata of west Texas and the mid-continent: Permian Basin Section. Society of Economic Palaeontologists and Mineralogists Publication, 92-33, 110-120 pp.

- McClain, J., 1997. *Tertiary carbonate biostratigraphy of northwestern Yucatan Peninsula, Mexico* Master's thesis. Northern Illinois University, DeKalb.
- McCord, W.P., Joseph-Ouni, M., Hagen, C., & Blanck, T., 2010. Three new subspecies of *Trachemys venusta* (Testudines: Emydidae) from Honduras, northern Yucatán (Mexico), and pacific coastal Panama. *Reptilia*. 71, pp. 39-49.
- Medina-Moreno, S.A., Jiménez-González, A., Gutiérrez-Rojas, M., & Lizardi-Jiménez, M.A., 2014. Hydrocarbon pollution studies of underwater sinkholes along Quintana Roo as a function of tourism development in the Mexican Caribbean. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 13(2):509-516.
- Mejía-Ortiz, L.M., López-Mejía, M., Pakes, J., Hartnoll, R.G. & Zarza-González, E., 2013. Morphological adaptations to anchialine environments in species of five shrimp families (*Barbouria yanezi*, *Agostocaris bozanici*, *Procaris mexicana*, *Calliasmata nohochi* and *Typhlatya pearsei*). *Crustaceana*. 86, pp. 578-593.
- Mejía-Ortiz, L.M., Zarza, E., & López, M., 2008. *Barbouria yanezi* sp. nov., a new species of cave shrimp (Decapoda, Barbouriidae) from Cozumel Island, Mexico. *Crustaceana*. 81, pp. 663-672.
- Mejía-Ortiz, L.M., Yáñez, G., & López-Mejía, M., 2007. Echinoderms in an anchialine cave in Mexico. *Marine Ecology*. 28, pp. 31-34
- Meléndez-Hevia, G., Cardozo-Moreira, J., & Carcavilla-Urquí, L., 2017. *Geoturismo: el paso de un recurso a un atractivo*. *Terr@Plural*, 11, 2, 327-337. DOI: 10.5212/TerraPlural.v11i2.0010
- Melosh, H.J., 1989. *Impact Cratering: A Geologic Process*. Oxford University Press, NY, 245 pp.
- Mendoza, M., Ortiz-Pérez, M.A., 2000. Caracterización geomorfológica del talud y la plataforma continentales de Campeche-Yucatán, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Ingeniería*. UNAM. Núm. 43, pp. 7-31.
- Menéndez, E., 1990. *Morir de alcohol. Saber e ideología médica*. Alianza Edit. Mexicana, México.
- Menéndez, E., 1993. Autoatención y participación social: estrategias o instrumentos en las políticas de atención primaria. En *Medicina tradicional 500 años después. Historia y consecuencias actuales*, editado por C. Roersch, 61-104. Santo Domingo: Instituto de Medicina Dominicana.
- Mercado-Salas, N.F., Morales-Vela, B., Suárez-Morales, E. & Iliffe, T.M. 2013. Conservation status of the inland aquatic crustaceans in the Yucatan Peninsula, Mexico: shortcomings of a protection strategy. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*. 23, pp. 939-951.

- Mercer, H.C., 1975. *The Hill Caves of Yucatán*. 2a Edición. University of Oklahoma Press, Norman.
- Merino-Virgilio, F. del C., Okolodkov, Y. B., Aguilar-Trujillo, A.C., Osorio-Moreno, I., & Herrera-Silveira, J.A. 2013. Florecimientos algales nocivos en las aguas costeras del norte de Yucatán (2001-2013) p. 161-180. En: A.V. Botello, J. Rendón von Osten, J. A. Benítez y G. Gold-Bouchot (eds.). *Golfo de México. Contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias*. UAC, UNAM-ICMyL, CINVESTAV-Unidad Mérida. 1176 p. ISBN 978-607-7887-71-3.
- Metcalf, C.D., Beddows, P.A., Gold-Bouchot, G., Metcalfe, T.L., Li, H., and Van Lavieren, H., 2011. Contaminants in the coastal karst aquifer system along the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Environmental Pollution*. (Barking, Essex : 1987). 159 (4), pp. 991-997. DOI: 10.1016/j.envpol.2010.11.031.
- Metcalf, C.D., Gold-Bouchot, G., Metcalfe, T.L., Li, H., Beddows, P.A. & Van Lavieren, H., 2009. Domestic Wastewater as a Source of Contaminants in Freshwater Aquifers in the Mayan Riviera Tourism Region of Mexico. Recuperado de http://www.inweh.unu.edu/Coastal/POPs/2009_Dominica/Metcalfeposter.pdf
- Miller, R.R., Minckley, A.L., & Norris, S.M., 2009. *Peces dulceacuícolas de México*. CONABIO, ECOSUR, SIMAC, DFC, Ciudad de México.
- Millet, L., 1991. Nuevos conceptos para antiguos hallazgos. *Boletín de la Escuela de Ciencias Antropológicas de la Universidad de Yucatán*, 99:17-23.
- Mirela, M., & Virsta, A., 2015. Environmental toxicity of lindano and health effect. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 16; 933-944.
- Mnif, W., Hassine, H., Bouaziz, A., Bartegi, A., Thomas, O., & Roig, B., 2011. Effect of endocrine disruptors: a review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 8, 2265-2303.
- Monroy-Ríos, E., & Beddows, P.A., 2015. EP53A-0979: Hydrogeothermal Convective Circulation Model for the Formation of the Chicxulub Ring of Cenotes in the Yucatan Peninsula, Mexico. *American Geophysical Union-AGU Fall Meeting*. San Francisco, California, Dec 14-18.
- Montero-García, I.A., Galindo-Trejo, J. y Wood-Cano, D., 2014. El Castillo en Chichén Itzá: Un monumento al tiempo. *Arqueología Mexicana* 21 (127): 80-85.
- Moore, Y.H., Stoessell, R.K., Easley, D.H., 1992. Fresh-Water/Sea-Water Relationship Within a Ground-Water Flow System, Northeastern Coast of the Yucatan Peninsula. *GroundWater*. 30(3): 343-350.
- Morales-Ojeda, S.M., Herrera-Silveira, J.A., & Montero, J., 2010. Terrestrial and oceanic influence on spatial hydrochemistry and trophic status in subtropical marine near-shore waters. *Water Research*. 44, pp. 5949-5964.

- Moreno-Pérez, P., Gamboa-Angulo, M., Heredia, G. *et al.*, 2014. Propiedades antagonistas de micromicetos aislados de cenotes de la península de Yucatán contra hongos fitopatógenos. *Revista Mexicana de Micología*. 40, pp. 27-36.
- Morgan, J., Warner, M., & Chicxulub Working Group, 1997. Size and morphology of the Chicxulub impact crater. *Nature*. 390, pp. 472-476.
- Morris, B.L., Lawrence, A.R., Buckley, D.K., Bridge, L.R., Williams, A.T., Trafford, J.M., Talbot, J.C., Goody, D.C., Macdonald D.M.J., Brewerton, L.J., 1994. *Impact of Urbanisation on groundwater in Merida, Mexico. Final report* (WC/94/38).
- Moulton, C.A., Fleming, W.J. Purnell, C.E., 1996. Effects of two cholinesterase-inhibiting pesticides on fresh water mussels. *Environ Toxicol Chem*. 15, No. 2, 131-137.
- Mrema, E.J, Rubino, F.M., Brambilla, G., Moretto, A., Tsatsakis, A.M. y Colosio, C. 2013. Persistent organo-chlorinated pesticides and mechanisms of their toxicity. *Toxicology* 307, 74-88.
- Mutchler, T., Dunton, K.H., Townsend-Small, A., Fredriksen, S., & Rasser, M.K. 2007. Isotopic and elemental indicators of nutrient sources and status of coastal habitats in the Caribbean Sea, Yucatan Peninsula, Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. 74, pp. 449-457.
- Nachmansohn, D. 1970. Proteins in excitable Membranes. *Science*, 168, 1059.
- Nájera-Coronado, M.I., 1988. *El don de la sangre en el equilibrio cósmico. El sacrificio y el autosacrificio sangriento entre los mayas*. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Nava, V.A., 2015. *Percepción, conocimiento local y descripción de la calidad del agua de cenotes de interés turístico y recreacional*. Tesis Doctoral. Departamento de Ecología Humana, Unidad de Mérida, Instituto Politécnico Nacional. 108 pp.
- Navarro-Mendoza, M. 1988. Inventario íctico y estudios ecológicos preliminares en los cuerpos de agua continentales en la reserva de la biósfera de Sian Ka'an y áreas circunvecinas en Quintana Roo, México. Inf. Téc., Centro de Investigación Quintana Roo/Cons. Nac. Cienc. Technol./U.S. Fish Wild. Serv., Chetumal. 240 p.
- Neiber, M.T., Hansen, F.C., Iliffe, T.M. *et al.*, 2012. Molecular taxonomy of *Speleonectes fuchscockburni*, a new pseudocryptic species of *Remipedia* (*Crustacea*) from an anchialine cave system on the Yucatan Peninsula, Quintana Roo, Mexico. *Zootaxa*. 3190, pp. 31-46.
- Newman, M., 1998. *Fundamentals of ecotoxicology*. Sleeping Bear/Ann Harbor Press, Chelsea, MI USA 401 pp.
- Nichols, H.T., & Bonner, T.H., 2014. First record and habitat associations of *Spongilla cenota* (Class Demospongiae) within streams of the Edwards Plateau, Texas, USA. *The Southwestern Naturalist*. 59, pp. 467-472
- Nichter, M. 2006. *Reducción del daño: una preocupación central para la antropología médica*. Desacatos. 109-132.

- NOAA. 2009. Zebrafish (*Danio rerio*) Husbandry and Colony Maintenance at the Northwest Fisheries Science Center Technical Memorandum NMFS-NWFSC-100 May 2009.
- Nsonguh, F., 2016. *Use and Evaluation of LiDAR for Mapping Sinkholes in Royal Spring Groundwater Basin. Theses and Dissertations –Earth and Environmental Sciences. University of Kentucky.* Paper 36. 49 pp.
- Olesen, J., Meland K., Glenner, H., Van-Hengstum, P.J., & Illife, T.M., 2017. Xibalbanus cozumelensis, a new species of Remipedia (Crustacea) from Cozumel, Mexico, and a molecular phylogeny of Xibalbanus on the Yucatán Peninsula. *European Journal of Taxonomy.* 316, pp. 1-27.
- ONU. 2014. *El derecho humano al agua y al saneamiento.* Recuperado de Naciones Unidas: http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml
- Orellana, R., Espadas, C., Conde, C., & Gay, C. 2009. Atlas. *Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán.* Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. Mérida, Yucatán, México. 115 pp.
- Orellana, R., Islebes, G., & Espadas, C. 2003. Presente, pasado y futuro de los climas en la Península de Yucatán. En: *Naturaleza y Sociedad en el área Maya.* Colunga-GarcíaMarín, P., A. Larqué Saavedra (eds.) Academia Mexicana de Ciencias-CICY. México. Pág. 37-52.
- Orme, S., Kegley, S., 2004. PAN Pesticide Database. *Pesticide Action Network*; North America San Francisco, CA. [Consulta 10 de Noviembre 2016].
- Ortiz, M., & Winfield, I., 2015. A new amphipod species (*Peracarida: Amphipoda: Ampithoidae*) collected from Cenote Aerolito, Cozumel Island, Quintana Roo. *Revista Mexicana de Biodiversidad.* 86, pp. 332-336.
- Ortiz-Alemán, C., & Urrutia-Fucugauchi, J., 2010. Aeromagnetic anomaly modeling of central zone structure and magnetic sources in the Chicxulub crater, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, doi:10.1016/j.pepi.2010.01.007.
- Ortiz-Solorio, A.C., & Cuanalo de la Cerda, E.H., 1978. *Metodología del levantamiento fisiográfico. Un sistema de clasificación de tierras.* Colegio de Posgraduados de Chapingo, México, 85 pp.
- Osten, JR, Ortiz-Arana, A., Guilhermino, L., Soares, A.M.V.M., 2005. In vivo evaluation of three biomarkers in the mosquitofish (*Gambusia yucatanana*) exposed to pesticides. *Chemosphere* 58(5):627-36
- Pacheco, J., Cabrera, A., Marín, L., 2000. Bacteriological contamination in the karstic aquifer of Yucatán, México. *Geofísica Internacional.* 39 (3), 285-291.
- Pacheco, J., Cabrera, A., 1996. Efecto del uso de fertilizantes en la calidad del agua subterránea en el estado de Yucatán. *Ing Hidrául Méx.* XI (I), 53-60

- Pacheco, J., Cabrera, S.A., Marín, L., Steinich, B., & Escolero, O., 2001. Nitrate Temporal and Spatial Patterns in 12 Water Supply Wells, Yucatán, México. *Environmental Geology*. 40(6):708-771.
- Pacheco, J.G., Cabrera, S.A., 1990. *Contaminación por nitratos en áreas rurales del Estado de Yucatán. Agua Potable*. Año V, No. 69, pp. 24-29.
- Pacheco-Ávila, J., & Cabrera-Sansores, A., 2003. Fuentes principales de nitrógeno de nitratos. *Ingeniería*, 7(2), 47-54.
- Pacheco, F.A., 2005. Caffeine as an environmental indicator for assessing urban aquatic ecosystems, *Cad. Saúde Pública, Rio de Janeiro*. 21:1884-1892.
- Palmer, A.N., 1986. *Prediction of contaminant paths in karst aquifers*. Proceedings of the 1st Conference on Environmental Problems in Karst Terranes and their Solutions, Bowling Green, KY. National Water Well Association, Dublin, OH, pp. 32-53.
- Pardo-Iguzquiza, E., Durán, J.J., Luque-Espinar, J.A., & Martos-Rosillo, S., 2014. Análisis del relieve kárstico mediante el modelo digital de elevaciones. Aplicación a la Sierra de las Nieves (provincia de Málaga). *Boletín Geológico y Minero*. 125 (3), pp. 381-389.
- Parker, F.D., & Stange, L.A., 1965. Systematic and biological notes on the tribe Platymantispini (*Neuroptera: Mantispidae*) and the description of a new species of Plega from Mexico. *The Canadian Entomologist*. 97, pp. 604-612.
- Paull, C.K., Caress, D.W., Gwiazda, R., Urrutia-Fucugauchi, J., Rebolledo-Vieyra, M., Lundsten, E., Anderson, K., & Sumner, E.J., 2014. Cretaceous-Paleogene boundary exposed: Campeche Escarpment, Gulf of Mexico. *Marine Geology*. 357, pp. 392-400.
- Payne, J., Mathieu, A., Melvin, W., Fancey, L., 1996. Acetylcholinesterase, an old biomarker with a new future? Field trials in association with two urban rivers and paper mill in Newfoundland. *Mar Poll Bull*. 32:2:225-231.
- Pech, D., Vidal-Martínez, V.M., Aguirre-Macedo, M.L., Gold, G.G., Herrera-Silveira, J.A., Zapata-Pérez, O., & Marcogliese, D.J., 2009. The checkered puffer (*Spheroides testudineus*) and its helminths as bioindicators of chemical pollution in Yucatan coastal lagoons. *Science of The Total Environment*. 40 (7), pp. 2315-2324.
- Pedley, H.M., 1975. *Miocene sea-floor subsidence and later subaerial solution subsidence structures in the Maltese Islands*. *Proceedings of The Geologists Association - PROC GEOL ASSOC*. 85. 533-547.
- Pedley, H.M., 1990. *Classification and Environment Models of Cool Freshwater Tufas*. *Sedimentary Geology*. 68. DOI: 143-154. 10.1016/0037-0738(90)90124-C.
- Penberthy, W.T., Shafizadeh, E., Lin, S., 2002. The zebrafish as a model for human disease. *Front Biosci*. 7, 9-1453.

- Pendleton, L., Donato, D.C., Murray, B.C., Crooks, W.S., Jenkins, A., Sifleet, S., Craft, C., Fourqurean, J.W., Kauffman, J. B., Marba, N., Megonigal, P., Pidgeon, E., Herr, D., Gordon, D. & Baldera, A., 2012. Estimating Global "Blue Carbon" Emissions from Conversion and Degradation of Vegetated Coastal Ecosystems. *PLOS ONE*. 7 (9), pp. 1-7.
- Penfield, G.T., Camargo-Zanoguera, A., 1981. Definition of a major igneous zone in the central Yucatán platform with aeromagnetism and gravity, en *Technical Program, Abstracts and Bibliographies, 51st Annual Meeting*, p. 37, Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, Oklahoma.
- Penney, J.T., & Racek, A.A. 1968. Comprehensive revision of a world-wide collection freshwater sponges (*Porifera: Spongillidae*). *United States National Museum Bulletin*. 272, pp. 1-184.
- Pepe, M., & Parise, M., 2014. Structural control on development of karst landscape in the Salento Peninsula (Apulia, SE Italy). *Acta Carsologica*. 43. DOI: 10.3986/ac.v43i1.643.
- Peraza, M.E., & Rejón, L., 1989. *Chichén Itzá*. Instituto Nacional de Antropología e Historia. Documento de circulación interna.
- Pérez-Ceballos, R., Pacheco-Ávila, J., Euán-Ávila, J.I., & Hernández-Arana, H., 2012. Regionalization based on water chemistry and physicochemical traits in the ring of cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of Cave and Karst Studies*. 74(1):90–102.
- Pérez-Ceballos, R. & Pacheco, J., Euán, J., & Hernández-Arana, H.A., 2012. Regionalization Based on Water Chemistry and Physicochemical Traits in the Ring of Cenotes, Yucatan, Mexico. *Journal of cave and karst studies the National Speleological Society bulletin*. 74. DOI:10.4311/2011es0222.
- Pérez-Herrera, N., Polanco-Minaya, H., Salazar-Arredondo, E., Solís-Heredia, M.J., Hernández-Ochoa, I., Rojas-García, E., Alvarado-Mejía, J., Borja-Aburto, V.H. y Quintanilla-Vega, B., 2008. PON1Q192R genetic polymorphism modifies organophosphorous pesticide effects on semen quality and DNA integrity in agricultural workers from southern México. *Toxicol. Appl. Pharm.* 230 (2): 261-268.
- Pérez-León, S., Schmitter-Soto, J.J. 2007. Distribution and taxonomy of the Genus *Gambusia* (*Teleostei: Poeciliidae*) in northern and eastern Yucatan Peninsula, México. *Universidad y Ciencia: Trópico Húmedo*. 23(2):167-171.
- Pérez-Rosas, N., Hazen, T.C., 1989. Survival of *Vibrio cholerae* in tropical Marine environments. *Applied Environmental Microbiology*. 55: 495-499.
- Perry, E., Marín, L., McClain, J., & Velázquez, G., 1995. Ring of Cenotes (sinkholes), northwest Yucatán, México: Its hydrogeologic characteristics and possible association with the Chicxulub impact crater, *Geology*. 23: 17-20.
- Perry, E., Velázquez-Olimán, G., Marín, L., 2002. The hydrogeochemistry of the karst aquifer system of the northern Yucatan Peninsula. México. *Int Geol Rev*. 44 (3), 191-221.

- Perry, E., Paytan, A., Pedersen, B., & Velázquez-Oliman, G., 2009. Groundwater geochemistry of the Yucatan Peninsula, Mexico: Constraints on stratigraphy and hydrogeology. *Journal of Hydrology*. 367, pp. 27-40.
- Perry, E., Swift, J., Gamboa, J., Reeve, A., Sanborn, R., Marín, L. & Villasuso, M. 1989. Geologic and Environmental Aspects of Surface Cementation, North Coast, Yucatan, Mexico. *Geology*. 17(9): 818-821.
- Perry, E., Vázquez-Oliman, G., & Socki, R.E., 2003. Hydrogeology of the Yucatán Peninsula. En S. Fedick, M. Allen, J. Jiménez-Osornio A. Gómez-Pompa (Edits.), *The Lowland Maya Area: Three Millennia at the Human-Wildland Interface* (pp.115-138). Nueva York, CRC Press.
- Personné, J.C., Poty, F., Vaute, L. & Drogue, C., 1998. Survival, transport and dissemination of *Escherichia coli* and *enterococci* in a fissured environment. Study of a flood in a karstic aquifer. *Journal of Applied Microbiology*. 84:431-438.
- Peterson, R.E., Theobald, H.M., Kimmel, G.L., 1993. Developmental and reproductive toxicity of dioxin and related compounds: crossspecies comparisons. *Crit Rev Toxicol*. 23, 283-335.
- Phillips, J.D., Schwanghart, W. & Heckmann, T. 2015. Graph theory in the geosciences. *Earth Sciences Review*. 143, pp. 147-160.
- Plan, L., Decker, K., Faber, R., Wagreich, M., Grasemann, B. 2009. Karst morphology and groundwater vulnerability of high alpine karst plateaus: *Environmental Geology*, 58 (2), 285-297. DOI: 10.1007/s00254-008-1605-5.
- Planchon, O., & Darboux, F., 2001. A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena*. 46, pp. 159-176.
- Polanco-Rodríguez, A.G., Navarro-Alberto, J.A., Solorio-Sánchez, J., Mena-Rejón, G.J., Marrufo-Gómez, J., Del Valls-Casillas, T.A., 2015. Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the Ring of Cenotes in Yucatán, México. *Water and Environment Journal*. 29, pp. 140-150.
- Polanco-Rodríguez, A.G., Navarro-Alberto, J.A., Solorio-Sánchez, J., Mena-Rejón, G.J., Marrufo-Gómez, J., Del Valls-Casillas, T.A., 2015a. Contamination by organochlorine pesticides in the aquifer of the ring of cenotes in Yucatan, Mexico. *Water Environ J*. 29(1):140-150. <http://dx.doi.org/10.1111/wej.12080>.
- Polanco-Rodríguez, A.G., Riba-López, M.I., DelValls-Casillas, T.A., Quattrocci, P., Navarro-Alberto, J., Solorio-Sánchez, J., Álvarez-Cervera, F.J., 2015b. Risk perception and chronic exposure to organochlorine pesticides in Maya communities of Mexico. *Hum. Ecol. Risk Assess*. <http://dx.doi.org/10.1080/10807039.2015.1004159>.
- Polanco-Rodríguez, A.G., 2016. *World Water Week. Emerging Pollutants in Water and Wastewater: UNESCO-Sida Project Case-Studies in Stockholm City Conference Center, Stockholm*. Lecturer, Stockholm.

- Polanco-Rodríguez, A.G., Riba-López, M.I., DelValls-Casillas, T.A., Araujo-León, J.A., Prusty, A.K., Álvarez-Cervera, F.J., 2017a. Levels of persistent organic pollutants in breast milk of Maya women in Yucatán, México. *Environ. Monit. Assess.* 189 (2017), 59.
- Polanco-Rodríguez, A.G., Riba-López, M.I., DelValls-Casillas, T.A., Araujo-León, J.A., Mahjoub, O., Prusty, A.K., 2017b. Monitoring of organochlorine pesticides in blood of Maya women with uterine cervix cancer from Yucatan, Mexico. *Environ. Pollut.* 220 (Part B), 853-862.
- Polanco-Rodríguez, A.G., Arcega-Cabrera, F., Araujo-León, J.A., Ocegüera-Vargas, I., 2017c. Perspectivas de la contaminación del acuífero en Yucatán, México: plaguicidas y metales pesados.
- Politoff, A., Blitz, A., Rose, S., 1975. Incorporation of Acetylcholinesterase into synaptic vesicles is associated with blockade of synaptic transmission. *Nature.* 256:324.
- Pope, K.O., Baines, K.H., Ocampo, A.C., & Ivanov, R. J., 1994. Impact winter and the Cretaceous/Tertiary extinctions: results of a Chicxulub asteroid impact model, *Earth Planetary Science Letters*, 128, 719-725.
- Pope, K.O., Ocampo, A.C., & Duller, C.E., 1993. Surficial geology of the Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico. *Earth, Moon, Planets*, 63, 93-1004.
- Pope, K.O., Ocampo, A.C., & Duller, C.E., 1991. Mexican site for K/T impact crater? *Nature*, 351, 105.
- Pratt, W.K., 1991. *Digital Image Processing*. Second ed. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Proveda, A. y Espejo, F., 2007. *El cráter de Chicxulub y la extinción de los dinosaurios hace sesenta y cinco millones de años*. Gobierno del Estado de Yucatán. 200 pp.
- Quinlan, J.F., Ewers, R.O., 1985. *Ground water flow in limestone terranes: strategy rationale and procedure for reliable, efficient monitoring of ground water quality in karst areas*. Proceedings of the 5th National Symposium and Exposition on Aquifer Restoration and Ground Water Monitoring, Columbus, OH, National Water Well Association, Worthington, OH, pp. 197-234.
- QRSS. 2019. *Survey and Cartography of The Underwater Caves of Quintana Roo, México*, Quintana Roo Speleological Survey.
- Radulović, M.M., 2013, A new view on karst genesis. *Carbonates and Evaporites*. 28 (4), pp. 383-397.
- Razo-Mendivil, U., Vázquez-Domínguez, E., & Pérez-Ponce de León, G., 2013. Discordant genetic diversity and geographic patterns Between *Crassicutis cichlasomae* (*Digenea-Apocreadiidae*) and its cichlid host, "*Cichlasoma*" *urophthalmus* (*Osteichthyes: Cichlidae*), in Middle-America. *The Journal of Parasitology*. 99, pp. 978-988.
- Rebolledo-Vieyra, M., & Urrutia-Fucugauchi, J., 2004. Magnetostratigraphy of the impact breccias and post-impact carbonates from borehole Yaxcopoil-1, Chicxulub impact crater, Yucatan, Mexico: *Meteoritics Planetary Science*, 39, 821-830.

- Rebolledo-Vieyra, M., Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L.E., Trejo-García, A., Sharpton, V.L., Soler-Arechalde, A. M., 2000. UNAM scientific shallow-drilling program of the Chicxulub impact crater, *International Geology Review*, 42, 928-940.
- Rebolledo-Vieyra M., Urrutia-Fucugauchi J. & López-Loera, H. 2010. Aeromagnetic anomalies and structural model of the Chicxulub multiring impact crater, Yucatan, Mexico. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 27 (1), pp. 185-195.
- Recinos, A., 1996. *Popol Vuh. Las antiguas historias del Quiché*. Fondo de Cultura Económica, México.
- Reeve, A.S., 1990. *The hydrogeology and Aqueous Geochemistry of the Western North Coast of the Yucatan Peninsula; Chuburna, Mexico*. Ms.: dissertation, Northern Illinois University, Dekalb, Illinois.
- Reeve, A.S., Perry, E.C., 1990. *Aspects and tidal analysis along the western north coast of the Yucatan Peninsula, Mexico*. AWRA: International Symposium on tropical hydrogeology, San Juan, Puerto Rico, July 23-27, 1990.
- Regan, C.T., 1914. Descriptions of two new cyprinodont fishes from Mexico, presented to the British Museum by Herr A. Rachow. *Annals and Magazine of Natural History, Including Zoology, Botany and Geology, Being a Continuation of the 'Magazine of Botany and Zoology,' and of Louden and Charlesworth's 'Magazine of Natural History'*, Series 8 14: 65-67.
- Reglamento de la Ley de Protección al Ambiente del Estado de Yucatán. 2011. México.
- Rendon-von Osten, J., Borges, M.M., Laso, S., 2016. Residuos de plaguicidas en cenotes de la Península de Yucatán. *Jaina Boletín Informativo*. 27(2): 9-15.
- Ribas-Fitó, N., Cardo, E., Sala, M., De Muga, M.E., Mazón, C., Verdú, A., Kogevinas, M., Grimalt, J.O., and Sunyer, J., 2003. Breastfeeding, Exposure to Organochlorine Compounds, and Neurodevelopment in Infants. *Pediatrics*. May 2003, 111 (5) e580-e585; DOI: <https://doi.org/10.1542/peds.111.5.e580>
- Rícan, O., Pialek, L., Dragova, K., & Novak, J., 2016. Diversity and evolution of the Middle American cichlid fishes (*Teleostei: Cichlidae*) with revised classification. *Vertebrate Zoology*. 66, pp. 3-102.
- Rice, D.S., & Puleston, P.E., 1981. *Ancient Maya Settlement Patterns in the Peten, Guatemala*. In *Lowland Maya Settlement Patterns*, edited by Wendy Ashmore, pp. 121-156. University of New Mexico Press, Albuquerque.
- Rico-Gray, V., 1982. Estudio de la vegetación de la zona costera inundable del noroeste del estado de Campeche, México. Los petenes. *Biótica*. 7, pp. 171-190.
- Rissolo, D.A., 2001. *Ancient Maya Cave Use in the Yalahau Region, Northern Quintana Roo, Mexico*. Tesis Doctoral, Universidad of California Riverside.

- Rivera-Núñez, T.A., 2014. *¿Conservacionismo biológico o agencia humana en el manejo ambiente? El caso del área de protección de flora y fauna otoc h ma'ax yetel kooh*. Tesis de maestría, CINVESTAV del IPN-Unidad Mérida.
- Roberts, D., 2004. Descent Into the Maya Underworld. *National Geographic Magazine*. Nov. 2004, Vol. 206, No. 5 36-53.
- Robledo, P., & Pomar, L., 2000a. Upper Miocene karst collapse structures of the east coast, Mallorca, Spain. *Acta Karsológica*. 2, 177-185 pp.
- Robledo, P., & Pomar, L., 2000b. Modelo genético de las estructuras de colapso kárstico del Mioceno Superior de Mallorca. *Geotemas*. 2, 189-193 pp.
- Robledo, P., & Pomar, L., 2001. The karst collapse structures in the Upper Miocene of the east coast of Mallorca: genetic model and classification features. *Geophysical Research Abstracts*. En: *Paleoclimatology: From process studies to reconstruction of the palaeoenvironment: advances in palaeoceanography and climatology*. 3, p. 9215.
- Robledo, P., 2005. *Análisis de los paleocolapsos kársticos en las plataformas carbonáticas del Mioceno superior de Mallorca: análisis geográfico, geológico, genético y evolutivo*. Tesis Doctoral. 370 pp.
- Robledo, P.A., & Durán, J.J., 2016. (Eds.). Large karst system of the world. *Journal of Earth Sciences. Special Issue*, 127 (1). 260 pp.
- Rocha, C.E., Iliffe, T.M., Reid, J.W., Suárez-Morales, E., 2000. Prehendocyclops, a new genus of the subfamily Halicyclopinae (*Copepoda*, *Cyclopoida*, *Cyclopidae*) from cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Sarsia*. 85, pp. 119-140.
- Rocha, H., Cardona, A., Graniel, E., Alfaro, C., Castro, J., Rúde, T., Herrera, E., & Heise, L., 2015. Interfases de agua dulce y agua salobre en la región Mérida-Progreso, Yucatán. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(6), 89-112.
- Rodríguez-Hernández, H.M. 2009. *Propuesta de regulación jurídica del entorno de los cenotes en propiedades particulares en el estado de Yucatán*. Tesis Maestro en Derecho, opción a Derecho Civil. Universidad Autónoma de Yucatán (UADY). Facultad de Derecho. 129 p. Mérida, Yucatán, México.
- Rodríguez-Fuentes, G., Armstrong, J., Schlenk, D., 2008. Characterization of muscle cholinesterases from two demersal flatfish collected near a municipal wastewater outfall in southern California. *Ecotoxicol Environ Saf*. 69 (3), 466-471.
- Rodríguez-Fuentes, G., Gold-Bouchot, G., Ceja-Moreno, V., 2000. *Can oil hydrocarbons inhibit fish acetylcholinesterase activity? A case study in two Mexican lagoons*. Third SETAC World Congress. 21-25 Mayo. Brighton, UK pp 106.
- Rodríguez-Fuentes, G., Luna-Ramírez, K., Soto, M., 2010. *Expresión genética en peces cebras enjaulados como indicadores de exposición a contaminantes en cuerpos de agua en la*

zona norte de Yucatán, México. Reporte Técnico Final. 29 de Noviembre del 2010. Centro de Investigación Científica de Yucatán.

Rodríguez-Fuentes, G., Luna-Ramírez, K., Soto, M. 2012. Gene expression in caged fish as indicators of contaminants exposures in tropical waterbodies. *Marine Environmental Research*, 75:62-66.

Rodríguez-Fuentes, G., Marín-López, V., Hernández-Márquez, E., 2016. Cholinesterases in *Gambusia Yucatan*: Biochemical Characterization and Its Relationship with Sex and Total Length. *Bull Environ Contam Toxi*. 1-5. DOI: 10.1007/s00128-016-1939-8.

Rohrer, P.C., 2012. *Geographic and environmental influence on maya settlement patterns of the Northwest Yucatan: an explanation for the sparsely settled western cenote zone.* Thesis of University of Central Florida, Department of Anthropology.

Rojas-Sandoval, C. (n.d.) *El inframundo Maya y los Sistemas Kársticos. Espacio Profundo edición 96.* Recuperado de <http://sds.yucatan.gob.mx/cenotes-grutas/documentos/el-inframundo-parte1.pdf>

Rojas-Sandoval, C., González-González, A., Terrazas-Mata, A., & Benavente-Sanvicente, M., 2010. Mayan Mortuary Deposits in the Cenotes of Yucatán and Quintana Roo, México. En: Leshikar-Denton M. E., Luna-Erreguerena P. (eds.) *Underwater and Maritime Archaeology in Latin America and the Caribbean.* Left Coast Press, Walnut Creek, pp. 143-153.

Rojas-Squella, X., Santos, L., Baumann, W., Landaeta, D., Jaimes, A., Correa, J., Sarmiento, O. & Ramos-Bonilla, J.P., 2013. Presence of organochlorine pesticides in breast milk samples from Colombian women. *Chemosphere*. 91. 10.1016/j.chemosphere.2013.02.026.

Rouseeuw, P.J., 1987. Silhouettes: a graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. *Journal of Computational and Applied Mathematics*. 20 (1), pp. 53-65.

Rowland, J.M. & Reddell, J.R., 1977. A review of the cavernicole Schizomida (*Arachnida*) of Mexico, Guatemala, and Belize. *Association of Mexican Cave Studies Bulletin*. 6, pp. 79-102.

Rubio, F., Rolán, E., Worsaae, K., Martínez, A., & González, B.C., 2015. Description of the first anchialine gastropod from a Yucatán cenote, *Teinostoma brankovitsi* n. sp.(*Caenogastropoda: Tornidae*), including an emended generic diagnosis. *Journal of Molluscan Studies*. 82, pp. 169-177.

Ruiz-Silva, J., Rivadeneyra, J., Pacheco, A., Morales-Arjona, L.J., 2007. *Caracterización de los Cenotes y Grutas del Estado de Yucatán, México.* Secretaría de Ecología. Gobierno de Yucatán, 215 pp.

Rushkys, U.A., 2007. *Patrimonio geológico e geoconservação no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais: potencial para a criação de um geoparque da UNESCO.* Instituto Geociencias, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Tese de Doutorado. 211 p.

Sadry, B.N., 2009. *Fundamentals of geotourism: with special emphasis on Iran.* Samt Organization Publishing, Tehran, Irán. Recuperado de <http://physio-geo.revues.org/1217>.

- Salguero, E., Urrutia-Fucugauchi, J., Ramírez-Cruz, L., 2010, Fracturing and deformation in the Chicxulub crater-Complex trace analysis of instantaneous seismic attributes: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 27, 175-184.
- Salomon, J.N., 2005. La spécificité des karst tropicaux. En: Salomon, J.N. y Pulina, M. Editores: Les Karsts des Regions Climatiques Extrêmes. *Karstologia, Memoires*, 14, 103-156.
- Sánchez, M., Alcocer, J., Escobar, E., & Lugo, A. 2002. Phytoplankton of cenotes and anchialine caves along a distance gradient from northeastern coast of Quintana Roo, Yucatan Peninsula. *Hydrobiologia*. 467, pp. 79-89.
- Sánchez y Pinto, I.A., 1999. *Modelo numérico del flujo subterráneo de la porción acuífera N-NW del estado de Yucatán. Implicaciones Hidrogeológicas*. Tesis de maestría de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Sang, S., Petrovic, S., Cuddeford, V., 1999. Lindane –A Review of Toxicity and Environmental Fate, prepared by *World Wildlife Fund Canada*.
- Sargent, C., & Johnson, T. 1996. *Medical Anthropology. Contemporary Theory and Method*, Westport, CT., Praeger. pp. 396-423.
- SARH. 1989. *Sinopsis Geohidrológica del Estado de Yucatán*. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Subsecretaría de Infraestructura Hidráulica. Dirección General de Administración y Control de Sistemas Hidrológicos. México, 50 pp.
- Sarlat, C.R., 1941. *Lo que Yucatán necesita para fomentar el turismo. Comunicaciones!* Ponencia sometida a la consideración de la 7a. Convención regional de turismo, en nombre y representación de la Cámara nacional de comercio e industria de Mérida. Cámara Nacional de Comercio e Industria de Mérida (Mexico). Universidad de Texas. 20 páginas
- Sarma, S.S.S., & Elias-Gutiérrez, M., 1999. A survey on the rotifer (Rotifera) fauna of the Yucatan Peninsula (Mexico). *Revista de Biología Tropical*. 47, pp. 187-196.
- Saturno, W., Taube, K. and Stuart, D., 2005. The Murals of San Bartolo, El Petén, Guatemala, Part I: The North Wall. *Ancient America*, 7. Barnardsville, North Carolina: Center for Ancient American Studies.
- Sauro, U., 2003. Dolines and sinkholes: aspects of evolution and problems of classification. *Acta Karstologica*. 32/2,41-52.
- Sauro, U. 2012. Closed depressions in karst areas. En: Culvet, D.C. y White, W.B. Editores. *Encyclopedia of Caves*. Elsevier, Amsterdam, 108-127.
- Schele, L. y Freidel, D., 1993. *A Forest of Kings. The Untold Story of the Ancient Maya*. Quill William Morrow, New York.
- Schmitter-Soto, J.J., 1998. *Catálogo de los peces continentales de Quintana Roo*. ECOSUR, San Cristóbal de Las Casas.

- Schmitter-Soto, J.J., 1999. Distribution of continental fishes in northern Quintana Roo, Mexico. *The Southwestern Naturalist*. 44, pp. 166-172.
- Schmitter-Soto, J.J., 2007. A systematic revision of the genus *Archocentrus* (*Perciformes: Cichlidae*), with the description of two new genera and six new species. *Zootaxa*. 1603, pp. 1-76.
- Schmitter-Soto, J.J., 2017. A revision of *Astyanax* (*Characiformes, Characidae*) in Central and North America, with the description of nine new species. *Journal of Natural History*. 51, pp. 1331-1424.
- Schmitter-Soto, J.J., Escobar-Briones, E., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Marín, L.E., 2002a. Los cenotes de la península de Yucatán. En: De la Lanza-Espino, G., García-Calderón, J.L. (eds.). *Lagos y presas de México*. AGT, México. pp. 337-381.
- Schmitter-Soto, J.J., Comín, F.A., Escobar-Briones, E., Herrera-Silveira, J., Alcocer, J., Suárez-Morales, E., Elías-Gutiérrez, M., Díaz-Arce, V., Marín, L.E. & Steinich, B., 2002b. Hydrogeochemical and biological characteristics of cenotes in the Yucatan Peninsula (SE Mexico). *Hydrobiologia*. 467 (1-3), pp. 215-228.
- Schmitter-Soto, J.J., & Salazar-Vallejo, S.I., 2003. Ecosistemas acuáticos y biogeografía de la península de Yucatán. In: Colunga-García Marín, P., Larqué-Saavedra, A. (Eds.) *Naturaleza y Sociedad en el Área Maya: Pasado, Presente y Futuro*. Academia Mexicana de Ciencias/ Centro de Investigación Científica de Yucatán, Mérida, pp. 81-93.
- Scholes, F. y Adams, E., 1938. *Don Diego Quijada alcalde mayor de Yucatán (1561-1565)*. V. 1 José Porrúa, México.
- Scholz, S., Kordes, C., Hamann, J., Gutzeit, H.O., 2004. Induction of vitellogenin *in vivo* and *in vitro* in the model teleost medaka (*Oryzias latipes*): comparison of gene expression and protein levels. *Mar Environ Res*, Vol 57, 235-244.
- Schulte, P., Alegret, L., Arenillas, I., Barton, P.J., Bown, P.R., Bralower, T.J., Christenson, G.L., Claeys, P., Cockell, C.S., Collins, G.S., Deutsch, A., Goldin, T.J., Goto, K., Grajales-Nishimura, J. M., Grieve R.A., Gulick, S.P., Johnson, K.R., Kiessling, W., Koeberl, C., Kring, D.A., MacLeod, K.G., Matsui, T., Melosh, J., Montanari, A., Morgan, J.V., Neal, C.R., Nichols, D.J., Norris, R.D., Pierazzo, E., Ravizza, G., Rebolledo-Vieyra, M., Reimold, W.U., Robin, E., Salge, T., Speijer, R.P., Sweet, A.R., Urrutia-Fucugauchi, J., Vajda, V., Whalen, M.T., & Willumsen, P.S., 2010. The Chicxulub Asteroid Impact and Mass Extinction at the Cretaceous-Paleogene Boundary. *Science*. 327, 1214-1218.
- SEDETUR. 2018. *Reporte Anual de Turismo Quintana Roo 2017*. Secretaría de Turismo, Gobierno del Estado de Quintana Roo, 35 pp.
- SEDUMA. 2008. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente. Actualización del programa de desarrollo urbano del centro de población de Puerto Morelos, Municipio de Benito Juárez, Quintana Roo 2008-2023. Recuperado de <http://seduvi.qroo.gob.mx/pdus/22ACTUALIZACIONPPDUPUERTOMORELOS20MAYO2009.pdf>
- SEDUMA. 2015. *Catálogo de cenotes*. Secretaría de Desarrollo Urbano y Medio Ambiente.

- Segovia-Pinto, V., 1981. La Cabeza Antropomorfa de Loltún, Yucatán. *Boletín ECUADY-Universidad Autónoma de Yucatán*, pp. 32-35.
- SERMANAT. 2014. *Riqueza de especies conocidas por grupos de fauna*. México.
- Serrano-Pavón, A., y Madrigal-Pérez, M., 2011. *Recomendaciones legales para el uso, aprovechamiento y conservación de los cuerpos de agua conocidos como "cenotes"*. Centro Mexicano de Derecho Ambiental (CEMDA). Comisión Nacional del Agua. México.
- SGM. 2007. *Carta geológica de México* [Geological map of Mexico]. Escala 1:2,000,000, 6th edn., Servicio Geológico Mexicano (SGM), Pachuca, México.
- SGM. 2007b. *Carta geológica minera*. Mérida F16-10. Servicio Geológico Mexicano.
- Sharer, R.J. & Traxler, L.P., 2006. *The ancient Maya*. Stanford University Press, Stanford.
- Sharpe, R.M. & Irvine, D.S., 2004. How strong is the evidence of a link between environmental chemicals and adverse effects on human reproductive health? *B.M.J.* 328, 447-451.
- Sharpton, V.L., Burke, K., Camargo-Zanoguera, A., Hall, S.A., Lee, D.S., Marín, L.E., Suárez-Reynoso, G., Quezada-Muñetón, J.M., Spudis, P.D. & Urrutia-Fucugauchi, J. 1993. Chicxulub multiring impact basin: Size and other characteristics derived from gravity analysis, *Science*, 261, 1564-1567.
- Sharpton, V.L., Dalrymple, G., Marin, L., Ryder, G., Shuraytz, B., & Urrutia-Fucugauchi, J. 1992. New links between the Chicxulub impact structure and the Cretaceous/Tertiary boundary. *Nature*. 359, pp. 819-821.
- Shofner, G.A., Mills, H.H., and Duke, J.E., 2001. A simple map index of karstification and its relationship to sinkhole and cave distribution in Tennessee: *Journal of Cave and Karst Studies*, 63, 67-75.
- Siart, C., Bubenzer, O., & Eitel, B., 2009. Combining digital elevation data (SRTM/ASTER), high resolution satellite imagery (Quickbird) and GIS for geomorphological mapping: A multi-component case study on Mediterranean karst in Central Crete. *Geomorphology*. 112. DOI:10.1016/J.GEOMORPH.2009.05.010.
- Smart, P.L., Beddows, P.A., Coke, J., Doerr, S., Smith, S., & Whitaker, F.F., 2006. Cave development on the Caribbean coast of the Yucatan Peninsula, Mexico. In: Harmon, R., Wicks, C. (Eds.), *Karst Geomorphology, Hydrology and Geochemistry*. *Geological Society of America*. 404, pp. 105-128.
- Smirnov, N.N. & Elías-Gutiérrez, M., 2011. Biocenotic characteristics of some Yucatan lentic water bodies based on invertebrate remains in sediments. *Inland Water Biology*. 4, pp. 211-217.
- Socki, R.A., Perry, J.E. & Romanek, C.S., 2002. Stable isotope systematics of two cenotes from the northern Yucatan Peninsula, Mexico. *Limnology and Oceanography*. 47, pp. 1808-1818.

- Soffritti, M., Belpoggi, F., Degli Esposti, D., Falcioni, L., & Bua, L., 2008. Consequences of Exposure to Carcinogens Beginning During Developmental Life. *Basic & clinical pharmacology & toxicology*. 102. DOI: 10.1111/j.1742-7843.2007.00200.x
- Soille, P., 2004. Optimal removal of spurious pits in grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 40, W12509: 1-9.
- Soille, P., Vogt, J. & Colombo, R., 2003. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. *Water Resources Research*. 39 (12).
- Sokal, R.R., & Sneath, P.H.A., 1963. *Principles of numerical taxonomy*. San Francisco and London, W. H. Freeman & Co. xvi+359 pp.
- Solís-Marín, F.A., & Laguarda-Figueras, A., 2008. Equinodermos. In: Mejía-Ortiz, L.M. (Ed.). *Biodiversidad Acuática de la Isla de Cozumel*. Universidad de Quintana Roo, Chetumal, pp. 187-214.
- Sosa-Escalante, J., & Chablé-Santos, J., 2013. Conservación y manejo de los cenotes. En: *Ordenamiento Territorial del Estado de Yucatán: Visión 2030* (G. García-Gil y J. Sosa Escalante, eds.). Universidad Autónoma de Yucatán. Gobierno del Estado de Yucatán. México: 63-74.
- SSA. 2000. Secretaría de Salud y Asistencia. Diario Oficial. Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.
- SSY. 2006. Servicios de Salud de Yucatán. Mortalidad por cáncer cervicouterino, 1990-2005.
- SSY. 2011. Servicios de Salud de Yucatán. 5° Curso internacional de prevención y control de cáncer cervicouterino, BOLETIN_SSY_061. Recuperado de: <http://www.salud.Yucatán.gob.mx>
- Stegeman, J.J., Hahn, M.E., 1994. Biochemistry and molecular biology of monooxygenase: current perspective on forms, functions, and regulation of cytochrome P450 in aquatic species. In: Malins, D.C., Ostrander, G.K. (Eds.), *Aquatic toxicology; Molecular, Biochemical and Cellular Perspectives*. Lewis Publishers, CRC press, Boca Raton, pp. 87-206.
- Stehle, S., Shultz, R. 2015. *Supporting Information for Agricultural Insecticides Threaten Surface Waters at the Global Scale*. Institute for Environmental Sciences, University Koblenz-Landau, Landau, Germany. 45 p.
- Steinich, B., 1996. *Investigaciones geofísicas e hidrogeológicas en el noroeste de la Península de Yucatán, México*. Ph. D. Tesis, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Steinich, B., Velázquez, G., Marín, L.E. & Perry, E., 1996. Determination of the ground water divide in the karts aquifer of Yucatán, Mexico, combining geochemical and hydrogeological data. *Geofísica Internacional*. 35 (2), pp. 153-159.

- Steinich, B., & Marín, L.E., 1997. Determination of flow characteristics in the aquifer of the Northwestern Peninsula of Yucatan, Mexico. *Journal of Hydrology*. 191 (1-4), pp. 315-331.
- Stone, A., 1995. *Images from the Underworld. Naj Tunich and the Tradition of Maya Cave Painting*. University of Texas Press, Austin.
- Stone, A., 1997. Regional variation in Maya cave art. *Journal of Cave and Karst Studies*. 59 (1), pp. 33-42.
- Streker, M. & Stone, A., 2003. *Arte rupestre de Yucatán y Campeche*. En: Kunne, M., Streker, M. (eds.). *Arte rupestre de México Oriental y Centroamérica*. Ibero-Amerikanisches Institute, Preubischer Kultur Bsit, Gebr. Mann Verlag, Berlín, pp. 53-77.
- Streker, M., 1976. Pinturas rupestres de la cueva de Loltún, Oxkutzcab Yucatán. *Boletín Científica Instituto Nacional de Antropología e Historia* 2 (8), pp. 3-8.
- Streker, M., 1978. *Arte rupestre de la península de Yucatán. Cuevas de la península de Yucatán*. Catálogo Ms.
- Streker, M., 1981. Exploraciones arqueológicas de Teobert Maller en cuevas yucatecas. *Boletín ECUADY-Universidad Autónoma de Yucatán*. 48-49, pp. 20-31.
- Streker, M., 1982. Representaciones de manos y pies en el arte rupestre de cuevas de Oxkutzcab, Yucatán. *Boletín ECUADY-Universidad Autónoma de Yucatán*. 52, pp. 47-57.
- Streker, M., 1984. Cuevas mayas en el municipio de Oxkutzcab (I): Cuevas Mis y Petrográficos. *Boletín ECUADY-Universidad Autónoma de Yucatán*. 68, pp. 21-28.
- Stuart, D., 2003. La ideología del sacrificio entre los mayas, *Arqueología Mexicana*, XI (63): 24-29. México: Raíces, INAH.
- Stuart, G.S. y Stuart, G., 1993. *Lost Kingdoms of the Maya*. National Geographic Society Washington, D.C., U.S.A.
- Sturm, A., De Assis, H.C.D., Hansen, P.D., 1999. Cholinesterases of marine teleost fish: enzymological characterization and potential use in the monitoring of neurotoxic contamination. *Mar Environ Res*, 47(4), 389-398.
- Suárez-Molina, V.M., 1977. *La evolución económica de Yucatán a través del siglo XIX*. Mérida: Universidad de Yucatán.
- Suárez-Arteaga, M.C., 2016. Coyuntura entre la normativa y la política pública en las prácticas culturales y el patrimonio: caso los cenotes mayas del municipio de Tulum, México. *Revista Ciencias Estratégicas*, 24 (36): 329-344.
- Suárez-Morales, E., & Gutiérrez-Aguirre, M.A., 2001. *Morfología y taxonomía de los Mesocyclops (Crustacea: Copepoda: Cyclopoida) de México*. ECOSUR y CONACYT, México.

- Suárez-Morales, E., & Reid, J.W., 2003. An updated checklist of the continental Copepod fauna of the Yucatan Peninsula, Mexico, with notes on its regional associations. *Crustaceana* 78 (8): 977-991.
- Suárez-Morales, E., Gutiérrez-Aguirre, M.A., Cervantes-Martínez, A. & Iliffe, T.M., 2017. A new anchialine Stephos Scott from the Yucatan Peninsula with notes on the biogeography and diversity of the genus (*Copepoda, Calanoida, Stephidae*). *Zookeys*. 671, p. 1.
- Suárez-Morales, E., Rivera-Arriaga, E., 1998. Hidrología y fauna acuática de los cenotes de la península de Yucatán. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, vol. 48, 151-164.
- Sumanasa, S., Lin, S., 2004. Zebrafish as a model system for drug target screening and validation. *Drug Discov Today*. 3, 89-96.
- Sustersic, F., 1994. Classic dolines of classical sites. *Acta Carsologica*, 23, 123-156.
- Sweeting, M.M., 1973. *Karst Landforms, selected glossary*, compiled by K. Addison, Sweeting, M.M., London.
- Szeroczyńska, K., & Zawisza, E., 2015. Cenotes-lakes of the Yucatan Peninsula (Mexico). *Studia Quaternaria*. 32, pp. 53-57.
- Szukalski, B.W., 2002. Introduction to cave and karst GIS: *Journal of Cave and Karst Studies*, 64, 3.
- Tabrez, S., & Ahmad, M., 2009. Toxicity, biomarker, genotoxicity and carcinogenicity of trichloroethylene (TCE) and its metabolites: a review. *J. Environ. Sci. Health Part C27* (3), 178e196.
- Tabrez, S., Priyadarshini, M., Priyamvada, S., Khan, M.S., Arivarasu, N.A., Zaidi, S.K., 2014. Gene-environment interactions in heavy metal and pesticide carcinogenesis. *Mutat. Res.* 760, 1e9.
- Tarboton, D.G., Bras, R.L., & Rodriguez-Iturbe, I., 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes*. 5, pp. 81-100.
- Taube, K.A., 1992. *The major gods of ancient Yucatan*. Dumbarton Oaks, Washington, D.C.
- Tedlock, D., 1985. *Popol vuh: The definitive edition of Mayan book of the dawn of life and the glories of gods and kings*. Simon and Schuster, New York.
- Telbisz, T., Látos, T., Deák, M., Szekely, B., Koma, Z., & Standovártandovár, T., 2016. The advantage of lidar digital terrain models in doline morphometry compared to topographic map based datasets-Aggtelek karst (Hungary) as an example. *Acta Karstologica* 45/1, 5-18.
- Tesis P./J. 40/2006, *Semanario Judicial de la Nación y su Gaceta*, Novena Época, t. XXIII, marzo de 2006, p. 1483.
- Thakur, J.S., Rao, B.T., Rajwanshi, A., Parwana, H.K., & Kumar, R., 2008. Epidemiological Study of High Cancer among Rural Agricultural Community of Punjab in Northern India. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 5(5) 399-407.

- Thompson, J.E.S., 1975. Introducción. En: Mercer, H.C. (ed.) *The Hill-Caves of Yucatán*, 2da edición. The University of Oklahoma Press, Norman.
- Thompson, J.E.S., 1982. *Historia y religión de los mayas*. Siglo XXI, México.
- Thompson, S.E.J., 1991. *Historia y religión de los mayas*. México: Siglo XXI, América Nuestra, Novena Edición.
- Thornbury, W., 1983. *Principios de geomorfología*. Primera parte. Editorial pueblo y Educación Ciudad de La Habana, Cuba. 314 p.
- Tibshirani, R., Walther, G. & Hastie, T., 2001. Estimating the number of clusters in a data set via the gap statistic. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*. 63, Part 2, 2001, pp. 411-423.
- Tong, Y., Shan, T., Poh, Y.K., Yan, T., Wang, H., Lam, S.H., Gong, Z., 2004. Molecular cloning of zebrafish and medaka vitellogenin genes and comparison of their expression in response to 17 beta-estradiol. *Gene Mar.* 17; 328:25-36
- Torres-Talamante, O., Alcocer, J., Beddows, P.A., Escobar-Briones, E.G. & Lugo, A. 2011. The key role of the chemolimnion in meromictic cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Hydrobiologia*. 677, pp. 107-127.
- Tourtellot, J.B., 2009. *Geoturismo para su comunidad*. National Geographic Society. Center for Sustainable Destinations. 24 p. Washington, EE.UU.
- Troccoli, G.L., Herrera-Silveira, J.A., & Comín, F.A., 2004. Structural variations of phytoplankton in the coastal seas of Yucatán, Mexico. *Hydrobiologia*. 519, pp. 85-102.
- Troche-Souza, C., Rodríguez-Zúñiga, M.T., Velázquez-Salazar, S., Valderrama-Landeros, L., Villeda-Chávez, E., Alcántara-Maya, A., Vázquez-Balderas, B., Cruz-López, M.I. & Ressler, R., 2016. *Manglares de México: extensión, distribución y monitoreo (1970/1980-2015)*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F
- Truhaut, R., 1977. Ecotoxicology: Objectives, principles and perspectives. *Ecotox Environ Safety*. 1, pp. 151-173.
- Tucker, M.E., 1985. *Einführung in die sedimentpetrologie*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 265 p.
- Tun-Dzul, F., Trejo-Torres, J.C., & Durán, G.R., 2010. Petenes. En: Durán R. y M. Méndez (Eds). 2010. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*. CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA. 496 pp.
- Turcotte, D.L., 1992. *Fractals and Chaos in Geology and Geophysics*, Cambridge Press, 221 pp.
- Uc-González, E., & Canché-Manzanero, E., 1988. Calcehtok desde la perspectiva arqueológica. *Boletín ECAUDY-Universidad Autónoma de Yucatán*. 89.
- Uc-González, E., & Huchím-Herrera, J.G., 1994. Las formas de almacenamiento de agua en algunas de las cuevas del Puuc. *Boletín ECAUDY-Universidad Autónoma de Yucatán*. 20 (117), pp. 5-17.

- Udvardy, M.D.F., 1975. A classification of the biogeographical provinces of the world. International Union for Conservation of Nature, Morges, Switzerland. Recuperado de: <http://fnad.org/Documentos/A%20Classification%20of%20the%20Biogeographical%20Provinces%20of%20the%20World%20Miklos%20D.F.%20Udvardy.pdf>
- UN. 2010. Asamblea General de las Naciones Unidas. Resolución A/RES/64/292. 2010 www.un.org/Depts/dhl/resguide/r64sp.shtml
- Uriarte-Torres, A.J., 2011. *Estrategias políticas y organización espacial durante el formativo en Ciudad Caucel, Yucatán*. Tesis de maestría, Centro de Estudios Arqueológicos, El Colegio de Michoacán.
- Urrutia-Fucugauchi, J., & Pérez-Cruz, L. 2008. Post-impact carbonate deposition in the Chicxulub impact crater region, Yucatan platform, Mexico. *Current Science*, 95, 241-252.
- Urrutia-Fucugauchi, J., & Pérez-Cruz, L. 2009. Multiring-forming large bolide impacts and evolution of planetary surfaces. *International Geology Review*, 51, 1079-1102.
- Urrutia-Fucugauchi, J., & Pérez-Cruz, L., 2016. Chicxulub asteroid impact: An extreme event at the Cretaceous/Paleogene boundary. En: *Extreme Events: Observations, Modeling and Economics*, American Geophysical Union Monograph, Wiley, 93-111.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Camargo-Zanoguera, A., Pérez-Cruz, L. & Pérez-Cruz, G., 2011. The Chicxulub multiring impact crater, Yucatan carbonate platform, Mexico. *Geofísica Internacional*, 50, 99-127.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Chávez, J.M., Pérez-Cruz, L., De la Rosa, J.L., 2008. Impact ejecta and carbonate sequence in the eastern sector of Chicxulub Crater. *Comptes Rendus Geosciences*, 341, 801-810 doi:10.1016 /j.crte.2008.09.001
- Urrutia-Fucugauchi, J., Marin, L., Trejo, A., 1996. UNAM scientific drilling program of Chicxulub impact structure -Evidence for a 300 kilometer crater diameter, *Geophysical Research Letters*, 23, 1565-1568.
- Urrutia-Fucugauchi, J., Morgan, J., Stoeffler, D., & Claeys, P., 2004. The Chicxulub scientific drilling project (CSDP). *Meteoritics Planetary Science*, 39, 787-790.
- Vail, G., 2000. Pre-hispanic Maya religion. *Ancient Mesoamerica*. 11(1):123-147.
- Vail, G. y Aveny, A. F. (ed.). 2005. *Madrid Codex: New Approaches to Understanding an Ancient Maya Manuscript*. University Press of Colorado.
- Valle-Levinson, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Amy, F., 2011. Tidal variability of salinity and velocity fields related to intense point-source submarine groundwater discharges into the coastal ocean. Waterhouse. American Society of Limnology and Oceanography, Inc. *Limnol. Oceanogr.* 56(4): 1213-1224.
- Van Hengstum, P.J., Reinhardt, E.G., Beddows, P.A., Huang, R.J. & Gabriel, J.J., 2008. Thecamoebians (*testate amoebae*) and foraminifera from three anchialine cenotes in

- Mexico: Low salinity (1.5-4.5 psu) faunal transitions. *The Journal of Foraminiferal Research*. 38, pp. 305-317.
- Van Maele-Fabry, G., Libotte, V., Willems, J., & Lison, D., 2006. Review and meta-analysis of risk estimates for prostate cancer in pesticide manufacturing workers, *Cancer Causes Control*, 17, 353-373.
- Vargas-Pacheco, E., & Arias-Ortiz, T., 2015. *The crocodile and the cosmos: Itzamkanac, the place of the alligator's House*. FAMSI, Inc. Recuperado de http://www.famsi.org/reports/03101/02vargas_arias/02vargas_arias.pdf. Último acceso: 19 de agosto de 2021
- Vasconcelos, G.J., & Swartz, R.G., 1976. Survival of bacteria in seawater using a diffusion chamber apparatus in situ. *Applied Environmental Microbiology*. 31: 913-920.
- Vázquez-Domínguez, E., Hernández-Valdés, A., Rojas-Santoyo, A., & Zambrano, L. 2009. Contrasting genetic structure in two codistributed freshwater fish species inhabiting highly seasonal systems. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 80:181-192.
- Velásquez-García, E., 2006. The Maya flood myth and the decapitation of the cosmic caiman. *The PARI Journal*. 7:1-10.
- Velázquez, O.G., 1995. *Estudio geoquímico del anillo de cenotes, Yucatán*. MSc Thesis, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Vera-Manrique, I., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., 2012. Effects of drought and subtidal sea-level variability on salt intrusion in a coastal karst aquifer. *Marine and Freshwater Research*. 63(6): 485-493.
- Vermeesch, P. & Morgan, J., 2004. Chicxulub central crater structure: Initial results from physical property measurements and combined velocity and gravity modeling. *Meteoritics Planetary Science*, 39,1019-1034.
- Vermeesch, P. & Morgan, J.V. 2008. Structural uplift the Chicxulub impact structure. *Journal Geophysical Research*, 113, B07103.
- Vidal-Zepeda, R., 2005. Las regiones climáticas de México. 1.2.2. *Temas selectos de Geografía de México*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. 210 p.
- Villalobos, M., 2001. Estrategias en la protección del patrimonio geológico andaluz. *Medio Ambiente*, v.37,n. 1, p. 36-39,
- Villasuso, M., González, R., Sánchez, I., Frías, J., 1984. Alteración de la interfase salina por pruebas de inyección en Yucatán. *Memorias del IV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, A.C.*, La Ingeniería Ambiental en el Futuro de México, Morelia, Michoacán, pp. 79-84.
- Villasuso, M., Méndez, R., 2000. A conceptual model of the aquifer of the Yucatan Peninsula. En: *Population, Development and Environment of the Yucatan Peninsula: From Ancient Maya to 2030*. Lutz W., Prieto L., Sanderson W. (Editores). Austria. pp. 120-139.

- Villasuso-Pino, M.J., Sánchez y Pinto, I.A., Canul-Macario, C., Casares-Salazar, R., Baldazo-Escobedo, G., Souza-Cetina, J., Poot-Euán, P., Pech-Argüelles, C., 2011. Hydrogeology and conceptual model of the karstic coastal aquifer in northern Yucatan state, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 13: 243- 260.
- Vinogradova, E.M., & Riss, H.W. 2007. Chironomids of the Yucatán peninsula. *Chironomus Journal of Chironomidae Research* (20).
- Vogt, E.Z., 1969. *Zinacantan. A Maya Community in the Highlands of Chiapas*. Harvard University Press, Cambridge, Mass., 1969. xxxii, 736 pp.
- Vogt, E.Z. y Stuart, D., 2005. Some Notes on Ritual Caves among the Ancient and Modern Maya. En: *The Maw of the Earth Monster, Mesoamerican Ritual Cave Use*. Editado por James E. Brady And Keith M. Prufer, pp. 155-185. University of Texas Press, Austin.
- Wall, J., Doctor, D.H., & Terzlotti, S., 2015. A semiautomated tool for reducing the creation of false closed depressions from a filled lidar-derived digital elevation model. 14th Sinkhole Conference, Rochester Minnesota, October 4-9. 255-262.
- Wang, L., & Liu, H., 2006. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling. *International Journal of Geographic Information Science*. 20 (2), pp. 193-213.
- Weide, A.E., 1985. Part I: Geology of Yucatan Peninsula. En: Ward, W.C., Weidie, A.E., Back, W., Andrews, A.P., New Orleans Geological Society (eds.), *Geology and hydrogeology of the Yucatan and quaternary geology of northeastern Yucatan Peninsula*: New Orleans, LA, New Orleans Geological Society, 160 pp.
- Wetzel, R.G., 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. 3ª ed. Academic Press, San Diego.
- White, W.B., & Culver, D.C. (eds.). 2012. *Encyclopedia of Caves*. Waltham, MA: Academic Press, p. 443.
- White, E.L., & White, W.B., 1969. Processes of cavern breakdown. *National Speleothem Society Bulletin*. 30, 115-129 pp.
- White, E.L. and White, W.B., 1979. Quantitative morphology of landforms in carbonate rock basins in the Appalachian Highlands. *Geological Society of America Bulletin*, 90(4):385-396. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1979\)90<385:QMOLIC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1979)90<385:QMOLIC>2.0.CO;2)
- White, E.L. y White, W.B. 2000. Breakdown morphology. En: A.B. Klimchouck, D.C. Ford, A.N. Palmer y W. Dreybrodt (eds.). *Speleogenesis. Evolution of karst aquifers*. National Speleological Society, Inc (Public). Alabama. USA. 427-429 pp.
- WHO. 2011. World Health Organization. *Strategies for the safe management of drinking-water for human consumption. Sixty-Fourth World Health Assembly*. Report by the Secretariat, A64/24, http://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/WHA64/A64_24-en.pdf

- Wiens, J.J., Fetzner, J.W., Parkinso, C.L. & Reeder, T.W., 2005. Hylid frog phylogeny and sampling strategies for speciose clades. *Systematic Biology*. 54, pp. 778-807.
- Wilkens, H., 1982. Regressive evolution and phylogenetic age: The history of colonization of freshwaters of Yucatan by fish and crustacea. *Association of Mexican Cave Studies Bulletin*. 8:237-243
- Williams, J.E., Johnson, J.E., Hendrickson, D.A. *et al.* 1989. Fishes of North America endangered, threatened, or of special concern: 1989. *Fisheries*. 14, pp. 2-20.
- Williams, P., 1972. Morphometric Analysis of Polygonal Karst in New Guinea. *Geological Society of America Bulletin - Geol. Soc. Amer. Bull.* 83. DOI: 10.1130/0016-7606(1972)83[761:MAOPK]2.0.CO;2.
- Wilson, I.B., Bergmann, F., Nachmansohn, D., 1950. Acetylcholinesterase. X. Mechanism of the catalysis of acylation reactions. *J Biol Chem*. Oct;186(2):781-90. PMID: 14794673.
- Wilson, J.L., Medlock, R.L. y Sels, R. 1993. Paleokarst within the Knox Group of Alabama, east side of the Black Warrior basin. En: D. Fritz, J.L. Wilson y D.A. Yurewicz (Eds.). *Paleokarst related hydrocarbon reservoirs*. SEMP Core Workshop, 18, 245-274 pp.
- Wolfe, M., 2014. Crisis del agua subterránea en México. Dinámica histórica: recursos, lucro y conocimiento en La Laguna, 1930-1970. *Revista de Historia Iberoamericana*, 7(2).
- Wollwage, L., Fedick, S., Sedov, S., & Solleiro-Rebolledo, E., 2012. The deposition and chronology of cenote T'isil: A multiproxy study of human/environment interaction in the northern Maya lowlands of southeast Mexico. *Geoarchaeology*. 27, pp. 441-456.
- World Tourism Organization. s.d. UNWTO. <http://unwto.org/en>.
- World Tourism Organization. 2011. UNWTO Barometer. UNWTO Publications Department. http://www.unwto.org/facts/eng/pdf/barometer/UNWTO_Barom10_update_april_en_excerpt.pdf
- Wu, Q., Liu, H., Wang, S., Yu, B., Beck, R., & Hinkel, K., 2016. A localized contour tree method for deriving geometric and topological properties of complex surface depressions based on high-resolution topographical data. *International Journal of Geographic Informantion Science*. 29 (12), pp. 2041-2060.
- Wunn, I., 2005. *Las religiones en la Prehistoria*. Ediciones Akal. 544 p.
- Xia, S., Li, X., Liu, R., Li, G., 2005. Pilot Study of drinking water production with ultrafiltration of water from the Songhuajiang River (China). *Desalination*. 179: 364-374.
- Xie, L., Thruppelton, K., Irwin, M.A., Siemering, G.S., Mekebri, A., Crane, D., Berry, K., Schlenk, D., 2005. Evaluation of estrogenic activities of aquatic herbicides and surfactants using a rainbow trout vitellogenin assay. *Toxicol Sci*. 87(2): 391-9.
- Yager J. 1987. *Speleonectes tulumensis* n. sp. (Crustacea, Remipedia) from two anchialine cenotes of the Yucatan Peninsula, Mexico. *Stygologia*. 3, pp. 161-166.

- Yager, J., and Hodell, D.A., 2008. The Collapse of Maya Civilization: Assessing the Interaction of Culture, Climate, and Environment. In: *El Nino, Catastrophism, and Culture Change in Ancient America*. D.H. Sandweiss and J. Quilter, eds. pp. 187-242. Washington, DC: Dumbarton Oaks.
- Zaldivar-Riverón, A., León-Regagnon, V., & Nieto-Montes de Oca, A. 2004. Phylogeny of the Mexican coastal leopard frogs of the *Rana berlandieri* group based on mtDNA sequences. *Molecular Phylogenetics and Evolution*. 30, pp. 38-49.
- Zhu, J., Taylor, T.P., Currens, J.C. & Crawford, M.M., 2014. Improved karst sinkhole mapping in Kentucky using LiDAR techniques: a pilot study in Floyds Fork Watershed. *Journal of Cave and Karst Studies*. 76 (3), pp. 207-2.





Autores





Alberto Sosa Hernández

Facultad de Ciencias, Unidad Académica de Yucatán,
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)

asosah@ciencias.unam.mx



Alexis Cervantes Pichardo

Unidad de Química Sisal-UNAM

alexiscervantes@ciencias.unam.mx



Alfredo Araujo León

Laboratorio de Cromatografía de la Facultad de Química
de la Universidad Autónoma de Yucatán

jesus.araujo@correo.uady.mx



Alfredo Gallardo-Torres

Laboratorio de Biología de la Conservación, Unidad
Multidisciplinaria de Docencia e Investigación,
Sede Parque Científico. Facultad de Ciencias, UNAM

gallalf@ciencias.unam.mx



Ángel G. Polanco Martínez

Centro de Investigaciones Regionales de la Universidad
Autónoma de Yucatán, México

polanco07@gmail.com



Benjamín Magaña Rodríguez

Independiente

benjamin.magana2@gmail.com



Carlos Paredes

Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
y Energía, Universidad Politécnica de Madrid

carlos.paredes@upm.es



Cinthya D. Grimaldo Hernández

Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación
Científica de Yucatán (CICY)

cinthya.grimaldo@gmail.com



Eduardo Batllori Sampedro

Centro de Investigación y Estudios Avanzados
(CINVESTAV), unidad Mérida

eduardo.batllori@hotmail.com



Elsa Noreña-Barroso

Unidad de Química Sisal-UNAM

enorena@yahoo.com



Eulogio Pardo

Instituto Geológico y Minero de España, Madrid, España

e.pardo@igme.es



Flor Elisa del Rosario Árcega Cabrera

Unidad de Química-Sisal, Facultad de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México

farcega@unam.mx

 <https://orcid.org/0000-0001-9794-833X>



Gabriela Rodríguez-Fuentes

Unidad de Química-Sisal, Facultad de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México

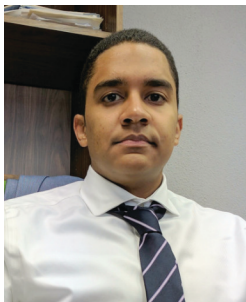
gabyrod98@gmail.com



Guillermo de Anda Alanís

Coordinación de Arqueología, responsable de proyectos
especiales de Arqueología subacuática,
Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH)

cenotexplorer@gmail.com



Héctor Matos

Departamento de Ingeniería Geológica y Minera
Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas
y Energía, Universidad Politécnica de Madrid



Iñaki Vadillo Pérez

Departamento de Ecología y Geología,
Facultad de Ciencias de la Universidad de Málaga

vadillo@uma.es



Ismael Alberto Ocegüera Vargas

Unidad de Química-Sisal, Facultad de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México

ocegüera13@gmail.com



Ismael Sánchez y Pinto

Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería.
Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología

sypinto@correo.uady.mx



Jaime Urrutia Fucugauchi

Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México
Instituto de Investigación Científica y Estudios Avanzados
Chicxulub, Mérida, Yucatán

juf@geofisica.unam.mx



Javier Lario

Facultad de Ciencias de la
Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED)

javier.lario@ccia.uned.es



Jorge A. Herrera Silveira

CINVESTAV Mérida-Instituto Politécnico Nacional.
Unidad Funcional y Laboratorio del Trópico

jorge.herrera@cinvestav.mx



José Juan Durán Valsero

Instituto Geológico y Minero de España

jj.duran@igme.es



Juan J. Schmitter-Soto

El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR), Departamento de
Sistemática y Ecología Acuática, unidad Chetumal

jschmitt@ecosur.mx



Julia Fraga

Departamento de Ecología Humana, Centro de
Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional-Unidad Mérida

jfraga@cinvestav.mx



Lane F. Fargher

Departamento de Ecología Humana, Centro de
Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional-Unidad Mérida

lanefargher@yahoo.com



Ligia Pérez Cruz

Instituto de Geofísica, Universidad Nacional
Autónoma de México

perezcruz@igeofisica.unam.mx



Luis Carcavilla

Instituto Geológico y Minero de España

l.carcavilla@igme.es



María del Carmen A. Carmona Lara

Instituto de Investigaciones Jurídicas, UNAM

carmona@unam.mx



Maribel Badillo-Alemán

Laboratorio de Biología de la Conservación, Unidad
Multidisciplinaria de Docencia e Investigación,
Sede Parque Científico. Facultad de Ciencias, UNAM

maribaam@ciencias.unam.mx



Melissa Lenczewski

Geology and Environmental Geosciences,
Northern, Illinois University

lenczewski@niu.edu



Miriam Elizabeth Lamas Cosío

Unidad de Química-Sisal, Facultad de Química,
Universidad Nacional Autónoma de México

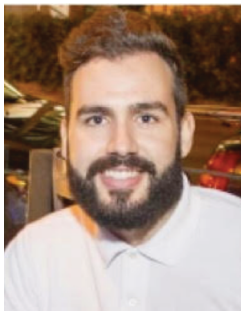
mairimeli_11@hotmail.com



Pedro Agustín Robledo Ardila

Unidad del Instituto Geológico y Minero de España
en las Islas Baleares

pa.robledo@igme.es



Ramón Castañer García

Instituto de Geofísica,
Universidad Nacional Autónoma de México

ramon_210692@hotmail.com



Ricardo Antorcha Pedemonte

Departamento de Ecología Humana, Centro de
Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto
Politécnico Nacional-Unidad Mérida

guacharo@live.com



Roger González Herrera

Universidad Autónoma de Yucatán. Facultad de Ingeniería
Cuerpo Académico de Hidráulica e Hidrología

roger.gonzalez@correo.uady.mx



Rosa María Leal Bautista

Unidad de Ciencias del Agua del Centro de Investigación
Científica de Yucatán (CICY)

rleal@cicy.mx



Xavier Chiappa-Carrara

Escuela Nacional de Estudios Superiores,
unidad Mérida, UNAM


xcc@ciencias.unam.mx

Los ojos de Yucatán. Una ventana al mundo subterráneo
es una obra editada por la Facultad de Química.

Se utilizaron en la composición las familias
de las fuentes Arial y Panton

Dirección General de la Publicación

Dra. Flor Árcega Cabrera

 <https://orcid.org/0000-0001-9794-833X>

Asesoría Editorial

Dr. Pedro Agustín Robledo Ardila

Dra. Gabriela Rodríguez Fuentes

Dr. Juan José Durán Valsero

Diseño y formato

LDG Neyra C. Silva Rosado

**Publicación autorizada por el Comité Editorial
de la Facultad de Química
Enero de 2021**



9 786073 041287