



Lago Alchichica

UNA JOYA DE
BIODIVERSIDAD



CONABIO
COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD

JAVIER ALCO CER
EDITOR

LAGO ALCHICHICA
UNAM



Lago Alchichica

UNA JOYA DE
BIODIVERSIDAD

Lago Alchichica

UNA JOYA DE BIODIVERSIDAD

JAVIER ALCO CER

EDITOR

Carlos Galindo Leal, Javier Alcocer, Ismael A. Montero García, Roberto E. Junco Sánchez, Gerardo Carrasco-Núñez, Margarita Caballero, Raúl A. Silva-Aguilera, Óscar Escolero, Luis A. Oseguera, Ma. Guadalupe Oliva Martínez, Gloria Vilaclara, Elizabeth Ortega Mayagoitia, Aideé Montiel-Martínez, Jorge Ciros-Pérez, Elva Escobar, Sergio Cohuo, Ma. del Carmen Hernández, Liseth Pérez, Raúl Acosta, Narcís Prat, Carles Ribera, Paraskeva Michailova, Omar A. Barrera-Moreno, Eduardo Suárez-Morales, Enrique Kato, Gabriela Parra-Olea, Elsay Arce Uribe, Xavier Chiappa-Carrara, Rosaluz Tavera, Eberto Novelo, Karim Benzerara, Purificación López-García, David Moreira, Estelle Couradeau, Patricia M. Valdespino-Castillo, Rocío J. Alcántara-Hernández, Luisa I. Falcón, Verónica A. Arellano Peralta, Ángel Arellano Peralta.



CONABIO
COMISIÓN NACIONAL PARA
EL CONOCIMIENTO Y USO
DE LA BIODIVERSIDAD

Catalogación en la publicación UNAM. Dirección General de Bibliotecas

Nombres: Alcocer Durand, Javier, editor, autor. | Galindo Leal, Carlos, autor. | Montero García, Ismael Arturo, autor. | Junco Sánchez, Roberto E., autor. | Carrasco Núñez, Gerardo, autor. | Caballero Miranda, Margarita Erna, autor. | Silva-Aguilera, Raúl Alberto, autor. | Escolero Fuentes, Oscar A., autor. | Oseguera, Luis Alberto, autor. | Oliva Martínez, María Guadalupe, autor. | Vilaclara, Gloria, autor. | Ortega Mayagoitia, Elizabeth, autor. | Montiel-Martínez, Aideé, autor. | Ciros-Pérez, Jorge, autor. | Escobar-Briones, Elva, 1957- , autor. | Cohuo-Duran, Sergio, autor. | Hernández Fonseca, María del Carmen, autor. | Pérez, Liseth, autor. | Acosta, Raúl, autor. | Prat, Narcís, autor. | Ribera, Carles, autor. | Michailova, Paraskeva, autor. | Barrera-Moreno, Omar Alfredo, autor. | Suárez, Eduardo, 1960- , autor. | Kato-Yamakake, Takeo Ángel, autor. | Parra Olea, Gabriela, autor. | Arce Uribe, Elsay, autor. | Chiappa Carrara, Francisco Xavier, autor. | Tavera Sierra, Rosa Luz, 1950-, autor. | Novelo, Eberto, autor. | Benzerara, Karim, autor. | López-García, Purificación, autor. | Moreira, David, autor. | Couradeau, Estelle, autor. | Valdespino Castillo, Patricia Margarita, autor. | Alcántara Hernández, Rocío Jetzabel, autor. | Falcón Álvarez, Luisa Isaura, autor. | Arellano Peralta, Verónica Araceli, autor. | Arellano Peralta, Ángel, autor.

Título: Lago Alchichica : una joya de biodiversidad / Javier Alcocer, editor ; Carlos Galindo Leal, Javier Alcocer, Ismael A. Montero García, Roberto E. Junco Sánchez, Gerardo Carrasco Núñez, Margarita Caballero, Raúl A. Silva-Aguilera, Óscar Escolero, Luis A. Oseguera, Ma. Guadalupe Oliva Martínez, Gloria Vilaclara, Elizabeth Ortega Mayagoitia, Aideé Montiel-Martínez, Jorge Ciros-Pérez, Elva Escobar, Sergio Cohuo, Ma. del Carmen Hernández, Liseth Pérez, Raúl Acosta, Narcís Prat, Carles Ribera, Paraskeva Michailova, Omar A. Barrera-Moreno, Eduardo Suárez-Morales, Enrique Kato, Gabriela Parra-Olea, Elsay Arce Uribe, Xavier Chiappa-Carrara, Rosaluz Tavera, Eberto Novelo, Karim Benzerara, Purificación López-García, David Moreira, Estelle Couradeau, Patricia M. Valdespino-Castillo, Rocío J. Alcántara-Hernández, Luisa I. Falcón, Verónica A. Arellano Perarlt, Ángel Arellano Peralta.

Descripción: Primera edición. | Tlanepantla de Baz, Estado de México: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala ; Ciudad de México : Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2019.

Identificadores: LIBRUNAM 2071498 (libro electrónico) | ISBN 9786073022781 (libro electrónico).

Temas: Lago Alchichica (Puebla). | Lagos - Puebla. | Biodiversidad acuática - Puebla. | Biodiversidad de agua dulce - Puebla. | Ecología de corrientes de agua - Puebla. | Conservación de los lagos - Puebla.

Clasificación: LCC QH98 (libro electrónico) | DDC 577.63—dc23

Forma correcta de citar:

Alcocer, J. (Editor). 2019. Lago Alchichica: Una joya de biodiversidad. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México. 244 p. ISBN: 978-607-30-2278-1.

Lago Alchichica: Una joya de biodiversidad

Primera edición: diciembre de 2019

Editor: Javier Alcocer

D.R. 2019 © Universidad Nacional Autónoma de México

Ciudad Universitaria, Alcaldía de Coyoacán,
C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Facultad de Estudios Superiores Iztacala

Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala,
Tlanepantla de Baz, CP 54090, Estado de México, México.

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad

Liga Periférico-Insurgentes Sur No. 4903,
Parques del Pedregal, Alcaldía de Tlalpan, CP 14010
Tlalpan, Ciudad de México, México.

Con autorización para publicar y distribuir
DGAJ-DPI-40-251119-689, otorgada por la UNAM.

www.iztacala.unam.mx

ISBN: 978-607-30-2278-1

Esta edición y sus características son propiedad de la
Universidad Nacional Autónoma de México.

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

Apoyo técnico

Sandra Heiras Garibay
Benjamín Quiroz Martínez
Cuidado de la edición

Mariana Vargas Sánchez
Diseño

Hecho en México

Contenido

| | |
|--|-----|
| EL ARCHIPIÉLAGO DE LOS AXALAPAZCOS Carlos Galindo Leal | IV |
| UNA VIDA EN ALCHICHICA Javier Alcocer | X |
| EL LAGO ALCHICHICA EN LA HISTORIA Y LA MEMORIA COLECTIVA Ismael A. Montero García y Roberto E. Junco Sánchez | 3 |
| ORIGEN Y FORMACIÓN DEL CRÁTER Gerardo Carrasco-Núñez | 19 |
| EL CLIMA EN LA REGIÓN Margarita Caballero, Raúl A. Silva-Aguilera y Óscar Escolero | 35 |
| EL AGUA SUBTERRÁNEA Y EL LAGO Raúl A. Silva-Aguilera y Óscar Escolero | 49 |
| EL CUERPO DE AGUA Javier Alcocer y Luis A. Oseguera | 63 |
| EL ALGA DORADA Ma. Guadalupe Oliva Martínez, Gloria Vilaclara y Elizabeth Ortega Mayagoitia | 79 |
| LA LAMA Gloria Vilaclara y Ma. Guadalupe Oliva Martínez | 91 |
| PLANCTON Aideé Montiel-Martínez y Jorge Ciros-Pérez | 103 |
| LA COCHINILLA ACUÁTICA Elva Escobar y Javier Alcocer | 123 |

| | |
|--|------------|
| LA CONCHILLA | 133 |
| Sergio Cohuo, Ma. del Carmen Hernández, Liseth Pérez y Javier Alcocer | |
| EL GUSANO DE SANGRE | 147 |
| Raúl Acosta, Narcís Prat, Carles Ribera y Paraskeva Michailova | |
| EL COPÉPODO HARPACTICOIDE | 155 |
| Omar A. Barrera-Moreno, Eduardo Suárez-Morales y Jorge Ciros-Pérez | |
| EL AXAYÁCATL | 169 |
| Enrique Kato, Javier Alcocer y Elva Escobar | |
| EL AJOLOTE | 179 |
| Gabriela Parra-Olea | |
| EL CHARAL | 191 |
| Elsah Arce Uribe, Javier Alcocer y Xavier Chiappa-Carrara | |
| EL ALGA VERDE-AZUL | 201 |
| Rosaluz Tavera, Eberto Novelo, Karim Benzerara, Purificación López-García, David Moreira y Estelle Couradeau | |
| LOS TEXCALES | 211 |
| Patricia M. Valdespino-Castillo, Rocío J. Alcántara-Hernández y Luisa I. Falcón | |
| LEYENDAS, MITOS Y TRADICIONES | 223 |
| Verónica A. Arellano Peralta, Ángel Arellano Peralta y Javier Alcocer | |





El archipiélago de los axalapazcos

Hace alrededor de 20 años se identificaron 35 “ecorregiones prioritarias” en el mundo. Los criterios para seleccionarlas fueron tres: riqueza de especies, riqueza de endemismos y grado de amenaza. En México se localizan tres de estas grandes regiones que abarcan casi dos terceras partes del país: Mesoamérica, el norte de Baja California ubicado en la provincia florística californiana y los Bosques de pino-encino en las Sierras Madres.

Uno de los aspectos más interesantes de estas regiones, también conocidas como “hotspots” es que evolutivamente se consideran “islas en el continente”. Su historia de aislamiento ha producido un sinnúmero de especies endémicas, es decir, que sólo viven en esa región.

Cuando acercamos nuestra lente un poco más al mapa, nos damos cuenta de que en México existen cientos de regiones que satisfacen los tres criterios de las grandes ecorregiones prioritarias. El complejo relieve del país, con diversidad de altas montañas, cuencas, lagos, ríos, manantiales, cuevas, etcétera, ha creado condiciones donde viven muchas especies endémicas que son irremplazables a nivel mundial.

El archipiélago de los axalapazcos es uno de estos ambientes prioritarios. Situado en la Cuenca Oriental en el estado de

Puebla (en medio de una zona árida), está conformado por seis lagunas: Alchichica, La Preciosa, Quechulac, Atexcac, Tecuitlapa y Aljojuca. Las cuatro primeras se encuentran en un radio de 7 km, mientras que las dos últimas están ubicadas a 30 km en dirección suroeste.

En el presente libro, se describe en detalle el axalapazco de mayor tamaño, un cráter volcánico de casi 2 kilómetros de diámetro y hasta 60 metros de profundidad con aguas de color azul turquesa. En esta isla acuática se ha desarrollado una comunidad de organismos únicos en el mundo, protagonistas de la ecología de este increíble lago y descritos a gran detalle en estas páginas. Con elegantes nombres científicos estos pequeños organismos que incluyen algas y cianobacterias microscópicas, diminutos crustáceos, mosquitos, chinches acuáticas y los gigantes, el Charal y el Ajo-lote de Alchichica han hecho que este ecosistema único en el mundo funcione por millones de años. Sus particulares texcales o microbialitos formados en las orillas por microorganismos se remontan a procesos que nos recuerdan el mismísimo origen de la vida.

A pesar de su magnífica y singular historia natural, Alchichica y sus hermanos han sido fuertemente deteriorados por las



Mapa original que se atribuye a la comisión geográfica-exploradora que elaboró los reconocimientos geológicos de grandes proporciones de los estados de Puebla, Veracruz, Tlaxcala, Oaxaca y Sonora. El total de trabajos elaborados por la comisión geológica para la formación del *Bosquejo de una carta geológica de la República* quedaron compilados en un catálogo que se presentó en la exposición universal de París en 1889 (Morelos 2012).

actividades humanas. Dos condiciones hacen que la Cuenca Oriental sea extremadamente frágil y susceptible a la desertificación: la aridez provocada por la sombra de lluvia de la Sierra Madre Oriental y la filtración del agua en sus suelos altamente permeables. Existen evidencias recientes que la región ha sido habitada desde hace mucho tiempo y que los extremos climáticos han tenido un fuerte impacto sobre las poblaciones ahí asentadas. La cuenca ha sido transformada. Sus bosques, matorrales y pastizales se han transformado en zonas de cultivo y de sobrepastoreo con la consecuente erosión del suelo. El desvío de afluentes naturales y la sobreexplotación del agua han reducido drásticamente a los lagos superficiales de la región. La contaminación por agroquímicos también ha aumentado. En algunos de los axalapazcos la introducción de especies exóticas como las carpas japonesas y la trucha arcoíris también ha tenido un impacto en las frágiles comunidades acuáticas.

Desde el año 2000, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad identificó a la Cuenca Oriental como una región hidrológica prioritaria (RHP 71). En 2010, al realizar de nuevo un ejercicio detallado de priorización, las tres lagunas del norte (Alchichica, La Preciosa y Quechulac) fueron identificadas como sitios prioritarios acuáticos epicontinentales de extrema importancia para la conservación de la biodiversidad.

A pesar de la importancia y fragilidad de la laguna Alchichica y los otros axalpaz-

cos de la región, aún no se han tomado medidas necesarias para su restauración y conservación. Esperamos que la detallada información científica de este ecosistema único en el mundo presentada en este libro, nos permita reflexionar y actuar con rapidez para proteger uno de los grandes tesoros del país.

Carlos Galindo Leal

**Comisión Nacional para el Conocimiento y
Uso de la Biodiversidad**





Una vida en Alchichica

Cuando yo era estudiante del primer año de la licenciatura en Biología, entre 1976-1979, tuve la oportunidad de conocer Alchichica, un lago espectacular. No sólo fue el hermoso color azul verdoso de sus aguas profundas lo que me maravilló, sino que era un lago con “agua salada”, con la presencia de un anillo casi continuo de “microbialitos” que, como arrecifes coralinos, se perciben claramente en la periferia del lago.

Fue el Dr. José Luis Arredondo Figueroa (UAM Iztapalapa) quien nos llevó a esa práctica de campo a Alchichica y es así como inició mi interés por conocer más sobre este —y otros— lagos, por eso me dediqué a estudiar Limnología. De hecho, mi primer evento internacional fue un trabajo limnológico básico derivado de ésta y muchas salidas a Alchichica.

Quién hubiera imaginado que unos años más tarde, en 1998, siendo ya investigador de la UNAM y dedicado a la Limnología, se diera inicio a la que ahora es la serie de tiempo de monitoreo limnológico más larga que existe para un lago mexicano. Por lo anterior, es un sitio de referencia de la Red Mexicana de Estudios Ecológicos a Largo Plazo (ramal de la ILTER), el primero cuyo ecosistema modelo es un lago. No

obstante, Alchichica llamó la atención de connotados científicos desde los años treinta y cuarenta. Basta con mencionar al estadounidense Edward H. Taylor y los españoles Bibiano Fernández Osorio y Tafall y a Fernando de Buen, quienes describieron el ajolote, el copépodo y el charal de Alchichica, respectivamente, como especies nuevas para la ciencia.

A partir de entonces, Alchichica ha sido visitado por numerosos y connotados científicos, muchos de ellos limnólogos, como el Dr. Ramón Margalef (España), el Dr. Vladimír Sládeček y el Dr. Jiří Komárek (República Checa), el Dr. William M. Lewis, Jr. y el Dr. John W. Morse (Estados Unidos), el Dr. Brian V. Timms (Australia), el Dr. William D. Williams (Reino Unido y Australia) y otros más. Incluso personal de la NASA, como el Dr. Chris McKay y su equipo de científicos planetarios, se interesaron en los microbialitos de Alchichica. No quisiera dejar de mencionar muchos colegas académicos que han contribuido al acervo de conocimientos del lago Alchichica, algunos de ellos autores de los capítulos incluidos en este libro.

Asimismo, en la larga y difícil tarea del monitoreo se cuenta con los Dres. Alfonso Lugo, María del Rosario Sánchez, Miroslav



A) Dr. Brian V. Timms acompañado por el Dr. Javier Alcocer en el lago Alchichica, 2002. (Fotografía: Elva Escobar). B) Dr. William M. Lewis, Jr. acompañado por el Dr. Javier Alcocer en el lago Alchichica, 2005. (Fotografía: Elva Escobar). C) Dr. Jiří Komárek visitó el lago Alchichica por primera vez en 1993 acompañado por la Dra. Rosaluz Tavera. Posteriormente, dictó clases en la Facultad de Ciencias, UNAM. (Fotografía: Rosaluz Tavera). D) Dr. Ramón Margalef López con un grupo de académicos y estudiantes durante su visita a los axalazcos de Puebla, 1987. (De izquierda a derecha al fondo: Alfonso Lugo, Enrique Kato, Martha Elena Valdez, Ramón Margalef, María Mir, Jiří Haussle, Mario Chávez, Manuel Elías, al frente Pedro Ramírez, Carlos Candalaria y alumnos. (Fotografía: Alfonso Lugo Vázquez).

Macek y a los M. en C. Laura Peralta y Mario M. Chávez.

Todo este trabajo de investigación conjunta y tras 20 años de monitoreo continuo el lago Alchichica ha develado que, entre otras maravillas, cuenta con una biodiversidad sinigual, la cual propició la elaboración de este libro. Alchichica no destaca por poseer numerosas especies sino más bien es un lago que cuenta con pocas, sin embargo, muestra un elevado grado de endemismos, mejor expresado, microendemismos, es decir, muchas de sus especies sólo habitan en este lago y en ninguna otra parte del mundo.

En este libro se presentan las especies microendémicas que al día de hoy han sido descritas y algunas que están en camino de serlo. Se acompañan de una introducción sobre lo que es el lago, cómo se originó la cubeta que lo alberga, así como una breve descripción de sus características ambientales. De igual manera se presenta una perspectiva histórica del lago así como algunas de las leyendas, mitos y tradiciones que se cuentan sobre él.

Deseo agradecer el apoyo de Mariana Vargas Sánchez, Sandra Heiras Garibay y Benjamín Quiroz Martínez quienes desinteresadamente contribuyeron por largas horas para llevar a buen fin la presente obra.

Asimismo, a Elva Escobar por su incansable apoyo, inspiración y valioso consejo a lo largo de tantos años de caminar juntos.

El lago Alchichica nos depara aún muchas sorpresas por descubrir.

Javier Alcocer

Universidad Nacional Autónoma de México





El lago
Alchichica en la
historia y la
memoria
colectiva

Ismael A. Montero García

Roberto E. Junco Sánchez

Las aguas de Alchichica tienen un sabor característico que le otorga sentido a su nombre, pues *alchichiccan* es un vocablo náhuatl que se traduce como *al-chichic-can*: *alli*, agua, nombre que sólo se usa en composición; *chichic*, amargo; *can*, donde. Así que *alchichiccan* significa “el lugar donde el agua es amarga” (Macazaga 1979).

Si continuamos con los conceptos ancestrales, la cosmovisión prehispánica asignó una denominación particular —muy acertada, por cierto— a estos lagos, de tal suerte que Alchichica es un axalapazco, del náhuatl *a(tl)*, agua; *xal(li)*, arena; *apaz(tli)*, cuenco; *co*, en. Así que *axalapazco* significa “en el cuenco de arena con agua”, por oposición se dice *xalapazco* sin la *a(tl)*, de agua, cuando se trata de un cráter carente de lago.

El cráter que hoy alberga al lago de Alchichica se formó hace más de 25 mil años, durante el Pleistoceno tardío; es más antiguo que la presencia del ser humano en la región que data hace unos 16 mil años según evidencias de herramientas obtenidas en Valsequillo, esto hace suponer que desde periodos tempranos esta región estuvo habitada por grupos humanos de cazadores recolectores y, posteriormente, con el surgimiento de la agricultura, por aldeas agrícolas.

Sin embargo, la ocupación de la zona de nuestro interés en términos arqueológicos sólo está documentada en fechas recientes, en términos históricos con dos sitios excavados: “Cerro Jorge”, 26 km al noroeste del lago de Alchichica en la ladera noroeste del Cofre de Perote a 2,950 m s.n.m. y la espectacular ciudad de Cantona, 18 km al noroeste.

Con referencia al sitio “Cerro Jorge”, García (2011) concluye que fue un centro ceremonial dedicado al culto del volcán Cofre de Perote como referente de la veneración a la naturaleza y el clima propicio para la agricultura, pues la traza urbana apunta a la cima del volcán con una ocupación que abarca desde el Preclásico tardío 400 a. C. hasta el Epiclásico 900 d. C. Por su parte, Cantona es una importante urbe con ocupación desde el año 600 a. C. hasta el 1050 d. C.

Cantona alcanza su máximo apogeo al final del periodo Epiclásico, cuando se supone que fue ocupada por grupos olmeca-xicalancas conformados por nahuas, mixtecos y chochopopolocas justamente en el momento en que Teotihuacán dejó de ser el centro de poder principal en la región y pequeños estados regionales rivalizaban por el control de las distintas rutas de

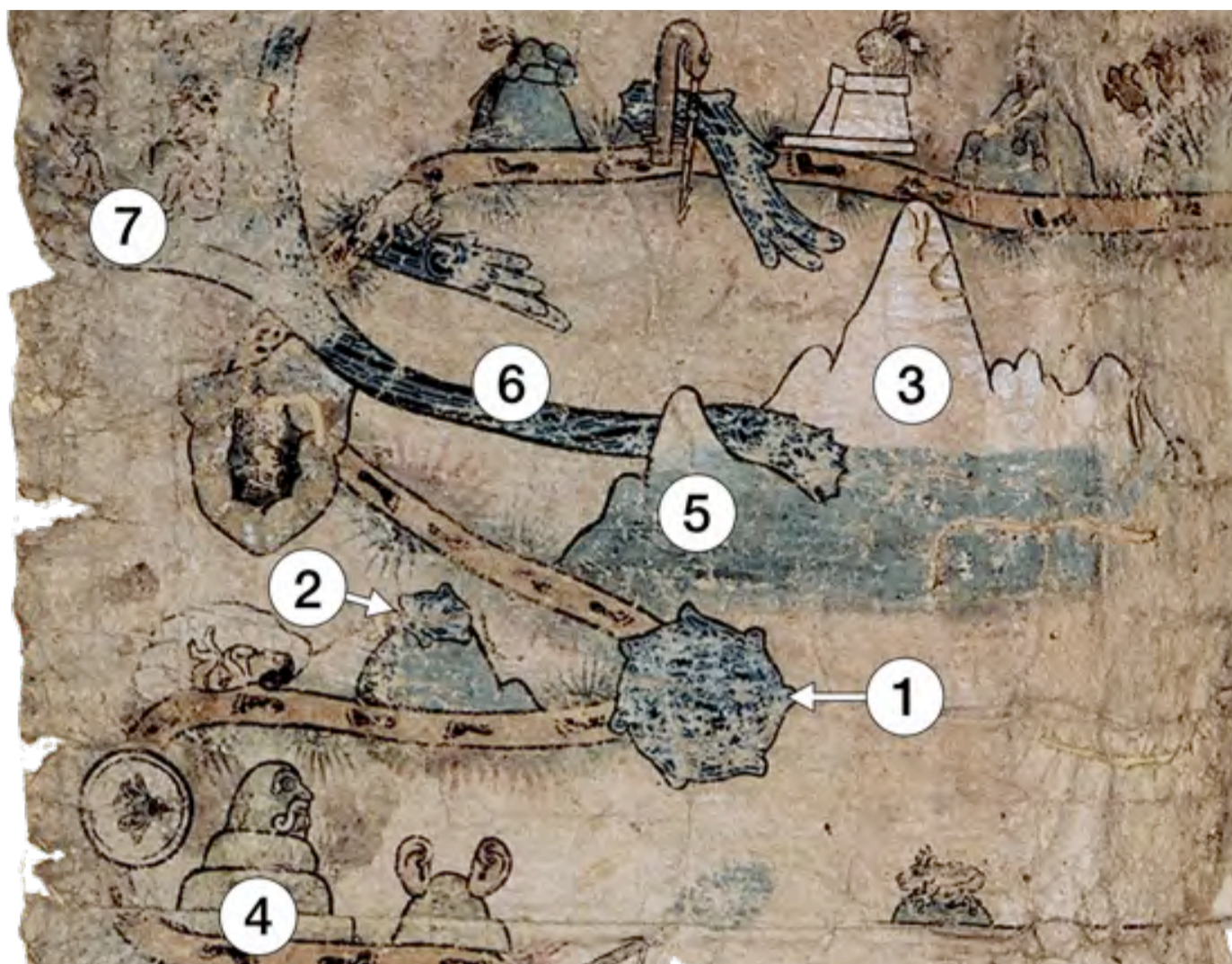


Figura 1.1. Fragmento del mapa de Cuauhtinchan II: 1) lago de Alchichica, 2) lago de Tecuitlapa, 3) Pico de Orizaba, 4) Cofre de Perote, 5) cerro Sillatepec, 6) río Jamapa, 7) Chocamán.

comercio, sobre todo el de la obsidiana gris oscura del yacimiento de Oyameles-Zaragoza, localizado 10 km al norte de la ciudad. Cantona se edificó sobre un derrame basáltico —malpaís— del volcán Xalapaxco, sus estructuras se levantan sobre roca volcánica, lo cual otorga al sitio una apariencia asombrosa. El paisaje está dominado por un sinnúmero de plantas desérticas, además de algunas coníferas.

Las construcciones se hicieron aprovechando lo escarpado del terreno, sin guardar una simetría como otros sitios arqueológicos de Mesoamérica. Cantona es una de las ciudades más urbanizadas del México prehispánico. Su extensa red de comunica-

ciones, con calzadas de hasta 1,000 m de longitud, en su interior permitía un estricto control sobre sus habitantes. Existían calles amuralladas que podían cerrarse fácilmente en caso de conflicto, lo que hizo de esta urbe una verdadera fortaleza. Los 24 juegos de pelota identificados en el sitio son, en conjunto, una clara muestra de la importancia que se le daba a las ceremonias religiosas. A la fecha se han registrado multitud de talleres de obsidiana, más de 100 plazas, 500 calles y alrededor de 3,000 patios habitacionales (Montero-García 2014).

La elevada densidad poblacional de Cantona demandó gran cantidad de recursos naturales, algunos de los cuales sin

duda se obtuvieron del lago Alchichica, con beneficios como la pesca del charal, actividad que hasta nuestros días pervive como una pesquería artesanal. También el consumo del ajolote que debió haber sido valorado por su carne blanca y delicado sabor (Alcocer 2013); además de su posible uso medicinal como ocurre en el lago de Pátzcuaro, donde un estudio etnofarmacológico reciente demuestra que los purépechas utilizan el ajolote para el tratamiento de enfermedades respiratorias y como proveedor de energía para niños y mujeres en periodos de lactancia (Velarde 2012).

Para finales del siglo XII d. C. Cantona se encontraba ya en decadencia, un grupo de chichimecas fueron convocados por los toltecas para someter a los olmeca-xicalancas de Cholula. Ésta es la narrativa que aborda el *Mapa de Cuauhtinchan II*, donde los descendientes de esos chichimecas, ya organizados en señoríos, forman alianzas regionales. En este discurso geopolítico, la descripción territorial toca al área de nuestro interés al ser representada por dos axalapazcos en el mapa que identificamos como el lago Alchichica (Fig. 1.1, núm. 1) y el lago de Tecuitlapa (Fig. 1.1, núm. 2). El topónimo del lago de Alchichica se dibuja como un círculo con siete protuberancias que simbolizan olas y una espiral al centro, el cuerpo de agua se representa en color azul, característico de un lago oligotrófico. Por su parte el lago de Tecuitlapa es un cuerpo de agua por encima de un cerro

como lo es realmente en el paisaje. Sin embargo, especialistas en el mapa no están de acuerdo en distinguir los lagos: para Tucker (2008) no se trata del lago Alchichica, sino del lago de Aljojuca;¹ para Yoneda en 1991 es Yayauualulco, hoy municipio de Ayahualulco,² por su etimología náhuatl, aunque en una publicación posterior del año 2005 ya no es el epónimo de este poblado y cambia de parecer e identifica al glifo como Tecuitlapan.

Esta controversia es resultado de interpretar al *Mapa de Cuauhtinchan II* en términos cartográficos y no topológicos; en la cartografía la ubicación y la distancia son determinantes; pero en la topología lo relevante son las señales perceptivas del paisaje vistas en este caso desde los caminos que marca el mapa con huellas de pies. Estas huellas nos llevan a criterios simbólicos y elementales de los cuales se desprende un sistema absoluto de representaciones privilegiadas, porque, si la intención fuera topográfica, reclamaríamos la ausencia de los demás lagos de la región. Entendemos la existencia de un antiguo camino que pasaba entre los volcanes Pico de Orizaba y Cofre de Perote proveniente de la costa del Golfo de México con destino al Altiplano central, porque esa fue la ruta que siguió Hernán Cortés en 1519. Investigadores contemporáneos destacan al lago Alchichica como un sitio relevante en sus mapas, es una señal perceptiva en el camino tal y como se manifiesta en el

¹ Aljojuca, aguas de color verdoso por su etimología náhuatl: *alt*, agua, *xoxoctic*, azul-verde.

² Ayahualulco, vocablo náhuatl, *alt*, agua, *yahualli*, cosa redonda; *co*, lugar: el lugar del agua redonda.

Mapa de Cuauhtinchan II, por ello considero que no se trata de alguno de los otros cuatro axalapazcos.

*El Mapa de Cuauhtinchan II*³ fue elaborado por los linajes dominantes de la región para declarar cuáles fueron las tierras y la extensión de sus señoríos antes de la conquista de Moctezuma I, en 1466 d. C. Ningún acontecimiento posterior a esa fecha es representado y las tierras fueron divididas por los victoriosos mexicas.

En 1519, la columna militar de Hernán Cortés remontó las laderas orientales del Cofre de Perote para alcanzar el Altiplano (Fig. 1.2). Salieron de Xalapa, el 18 de agosto, tomaron camino por Xicochimalco (Xico Viejo), Ixhuacán (Izhuacán de los Reyes), Ayahualulco y Cuauhtotolapan. Alcanzaron la árida altiplanicie en el poblado de Chichicuauhtla junto al lago Alchichica, donde recibieron a un mensajero de Moctezuma (García 2011). Antonio de Solís, por encargo real, escribió la *Historia de la Conquista de México*, inspirada en los relatos de Hernán Cortés, López de Gómora y Bernal Díaz del Castillo. La obra fue publicada en 1684, en su capítulo XIV se describe el trayecto hasta que “llegaron a la cumbre”, esto es al Altiplano Central:

Entróse luego en lo áspero de la sierra; primera dificultad del camino de Méjico, donde padeció mucho la gente, porque fue necesario marchar tres días por una montaña inhabitable, cuyas sendas se formaban de precipicios. Pasaron a fuerza de brazos y de ingenio las piezas de artillería,

y fatigaban más las inclemencias del tiempo. Era destemplado el frío; recios y frecuentes los aguaceros; y los pobres soldados sin forma de abarracarse para pasar las noches, ni otro abrigo, que el de sus armas, caminaban para entrar en calor, obligados a buscar el alivio en el cansancio. Faltaron los bastimentos, última calamidad en estos conflictos, y ya empezaba el aliento a porfiar con las fuerzas cuando llegaron a la cumbre.

Ya en la altiplanicie, la situación no mejoró, así se lee en *La Relación de Andrés de Tapia sobre la Conquista de México* (1866), obra escrita de primera mano y con razonable proximidad temporal a los hechos por ser Tapia un testigo presencial:

[...] las cuales veinte leguas anduvo por cabe unos lagos de agua salada como de la mar e por tierra de salitral, do el dicho marqués (Hernán Cortés) y su gente pasaron alguna necesidad de hambre, aunque más de sed, y llegó a un pueblo que se dice Cacotlan (Zautla): preguntó al señor de él si era vasallo de Mutezuma, y él le respondió: “¿Pues quién hay que no sea vasallo dese señor?”.

De Alchichica continuaron a Tepeyahualco para dirigirse al norte con destino a Zautla o Xocotlan en la cuenca del río Apulco y continuar después a Tlaxcala y México. Xocotlan hoy es Santiago Zautla, algo diferente a lo mencionado por Ixtlilxóchitl y Cervantes de Salazar que llamaron a este poblado Zacatlán; Díaz del Castillo habló tanto de Xocotlan como de Castilblanco (porque algunos portugueses en la expedi-

³ El *Mapa de Cuauhtinchan II* es una copia realizada en el año de 1540 d. C. de un documento producido por los cuauhtinchantlacas poco después del año 1466 d. C. para apelar ante los mexicas sus derechos conculcados (Martínez 2009).



Figura 1.2. Fragmento del mapa de Juan Miralles (2010) que describe la ruta de Hernán Cortés en 1519, aquí se denota a la laguna Alchichica de forma relevante, también aparece en la versión de Ramírez de Alba (2013) entre otros.

ción pensaban que parecía un Castel Blanco que conocían), Cortés lo llamó Caltami, López de Gómara como Zacotlán y Tapia como se ha citado, Cacotlan (Thomas 1995).

Durante su estancia en Tepeyahualco antes de llegar a Zautla, crónicas locales afirman que Cortés fue recibido cordialmente por los caciques Atonaletzin de Tepeyahualco y Tlamapanatzin de Axapusco (Achichil cachoca). En los *Documentos cortesianos*⁴ cobran notoriedad estos personajes como aliados preponderantes de Cortés en su camino a México, una vez bautizados tomaron el nombre de Francisco Moctezuma Atonaletzin y Esteban López Tlamapanatzin, como se refiere en el documento apócrifo

conocido como la *Merced y mejora de Hernán Cortés a los caciques de Axapusco y Tepeyahualco*. Ahí, donde se detallan sus méritos a favor de los conquistadores (véase el facsímil en Martínez 2014), el escrito fue presentado en el siglo XVIII, por un pretendiente a cacique en Axapusco, quien exhibió estos legajos falsos supuestamente firmados por Cortés en 1526, el título contiene además de los méritos de los caciques, alusiones románticas a antiguas profecías que advertían la llegada de Cortés y la visión de Acamapichtli, esas falsificaciones son ahora claramente reconocibles (Gibson 1984).

Bajo el dominio español, a finales del siglo XVI, la región tomó notoriedad para

⁴ Con exclusión de las *Cartas de relación*, se conoce como *Documentos cortesianos* a los textos firmados por Hernán Cortés y documentos apócrifos atribuidos al mismo Cortés, así como también a los informes de los hechos que lo involucraban, cédulas, provisiones, instrucciones, juicios, denuncias, reclamaciones y otros documentos a favor o en contra suya. Abarcan un largo periodo, iniciado en 1518, con las disputas con Diego de Velázquez gobernador de Cuba, a 1548, un año después de su muerte.

los eruditos por la singularidad de los lagos de Alchichica, Quechúlac y Tlachac. Fray Juan de Torquemada empezó a escribir sobre la cultura mexicana en 1592, le tomó 20 años terminar su obra cumbre *Los veinte yvn libros rituales i Monarchia Indiana*, que fue publicada en 1615,⁵ el siguiente extracto de su obra describe los mencionados lagos como consta en su libro XIV:

Capítulo XLI. Que trata de otras sierras y cosas maravillosas de ellas

De esta parte que mira al poniente, volviendo al mediodía de estas serranías dichas, hay otras yendo de México a la Vera Cruz [...].

En estos llanos de Perote están las lagunas que llaman de Tlachac y Atlchichica y Quicholac, que algunos quisieron decir que en otros tiempos fueron cerros y volcanes y que tiempo los consumió, y que se hundieron y quedaron de ellos estas lagunas, que son cinco o seis; y de esto no hago caso porque no sé la verdad que tiene, dejándolo a juicio de Dios, que sabe lo que en esto ha habido; sólo digo que por los bordos se reconoce haberse hundido algo en lo de en medio, y están formadas, como unas calderas y sus aguas están hundidas dentro; el agua de estas lagunas es salobre y muy clara y parecen respiraderos de la misma tierra; crían un pescadillo menudo y blanco, que llaman peixe-rey. Estas lagunas que tienen hundida y baja el agua, están apartadas unas de otras, a una y dos leguas y a tres y a más y a menos distancia; los naturales de esta tierra no saben decir lo que puede ser, ni cómo se

hayan hecho allí, ni de dónde se ceben de las aguas que tienen, porque están en unos muy grandes y extendidos llanos, sin tener corrientes de ninguna parte y aquí no podemos decir más, sino que Dios las puso en estos altos y secos llanos por mostrar a los hombres su omnipotencia y secretos inmensos suyos, apartados del juicio de los hombres.

A estas lagunas u ojos de agua no se les halla fondo, aunque se ha procurado saber y echar cuerda; crecen y menguan a sus horas como crece y mengua la mar, y por esta causa han querido decir algunos de nuestros españoles, que son respiraderos de la mar, aunque pienso que no satisface este parecer, porque de donde están las lagunas a la mar hay gran cumbre y altura y parece imposible imaginario, sino que la naturaleza suprema, que es Dios, las puso en aquel puesto y las conserva en la manera dicha. Verdad sea que me acuerdo haber leído en el libro del Eclesiastes una anotación de nuestro Nicolao de Lira [Eccles. 1. Et ibi Lira.], declarando aquellas palabras del capítulo primero, que dicen: Los ríos salen de la mar y vuelven lugar donde salieron. Dice, pues, este sabio varón, que por lugares ocultos y subterráneos salen las aguas de la mar a partes distantes de la tierra, y con movimiento natural pueden subir tanto cuanto es la superficie y altura mar y mucho más; y la causa, dice, que es porque pasando por las venas la tierra se endulzan, por pasar como por coladero, donde dejan la mezcla mixtura de la sal que tienen incorporada y cobran dulzor contrario al salitre que tenía, y por consiguiente manera se hacen más leves y livianas que lo eran antes, para poder subir a lo alto y sobrepujar la superficie de las aguas de la mar; y si concedemos esta razón, también

⁵ Para realizar esta obra Torquemada se basó en códices, pinturas, manuscritos, tradición oral y el trabajo de otros cronistas del siglo XVI como los frailes Bernardino de Sahagún, Motolinía, Francisco Jiménez y Jerónimo de Mendieta; además, de documentos de Hernán Cortés, Francisco López de Gómara y Antonio de Herrera entre otros.

es muy creíble que estas aguas son de la mar y que llevan camino los que primero lo dijeron.

Al pasar del tiempo, la Nueva España fue escenario de confrontación, para el siglo XVII se encontraron en el plano político las disputas con los jesuitas, los intereses portugueses, el pago de diezmos, la Inquisición y otras tantas diferencias sociales que enfrentó don Juan de Palafox y Mendoza como obispo de Puebla.⁶ Sus partidarios fueron gente humilde del pueblo contrapuesta a la corrupción. El reformista Palafox se sabía amenazado en este torbellino, así que deja su obispado secretamente el 17 de junio de 1647, para ocultarse, hasta que la situación se tornara a su favor; en su partida tomó como refugio una cueva en Alchichica, así se asentó en la *Colección de providencias diocesanas del obispado de Puebla...* de Fabián y Fuero (1770, cap. XXVI):

[...] á retirarse (don Juan Palafox) de esta Ciudad secretamente desde el día 17 del expresado mes de Junio y huir de la temeridad de sus contrarios, pasando 16 ó 17 días en las Minas desiertas de Alchichica, entre las mayores olas de tribulación y amargura, que eso quiere decir en Mexicano Alchichica, Aguas amargas y escribiendo en defensa de la Dignidad, oculto en las incomodidades de una cueva pequeña, detrás de las dos Sierras que

llaman las Derrumbadas, junto á las quiebras y faldas, por la parte de Occidente, del celebre, elevado y fragoso Volcán, que vulgarmente nombran Pico de Orizaba.⁷

Para el periodo novohispano encontramos que dos localidades responden al nombre de Alchichica, ambas en el actual estado de Puebla. San Martín Alchichica, población aledaña a la actual Izúcar de Matamoros (cfr. Alcedo 1784), que no debe confundirse con San José Alchichica, que se encuentra junto al lago homónimo de nuestro interés.⁸ Cabe decir que, de San Martín Alchichica, el mismo Alejandro von Humboldt (2011) hace mención de una mina denominada Alchichica, en la que se detalla la cantidad de mercurio perdido en los procesos de amalgamación utilizados en diferentes distritos de minas para extraer plata del mineral. Puede caerse fácilmente en confusión pues también había minas cerca de San José Alchichica, como lo refiere la anterior cita de Torquemada. Es más, el axalapazco de La Preciosa, a 10 km de Alchichica también responde al nombre de lago las Minas, por las minas de extracción de oro cercanas que actualmente se encuentran abandonadas. En el *Plano orográfico de la zona recorrida por el ferrocarril mexicano* de Antonio García Cubas, de 1877, encontramos que próximo al lago Alchichica, se encuentra un

⁶ Don Juan de Palafox y Mendoza, arzobispo y virrey de la Nueva España y obispo de Puebla, fundador de la primera biblioteca pública del continente americano, hoy Biblioteca Palafoxiana, promotor del libre acceso a la información, reformador de la iglesia, constructor de la catedral de Puebla. Fue beatificado por la Iglesia Católica el 5 de junio del año 2011 por Benedicto XVI.

⁷ Para el lector que desee conocer más sobre este periplo de don Juan de Palafox, véase Gallego 2000.

⁸ Según el *Diccionario geográfico, histórico y biográfico de los Estados Unidos Mexicanos* de Antonio García Cubas (2015), hay un rancho con el nombre de Alchichica en el municipio de Tlaltizapán, estado de Morelos.

cuerpo de agua con el nombre de La Preciosa Mineral (Fig. 1.3) con lo que se confirma la actividad minera en la región para tiempos históricos.

Llama la atención otro plano cartográfico del siglo XIX, en el que se da cuenta del lago Alchichica, con una nota entre paréntesis que lo describe como un “volcán de agua”, se trata del Plano de la Hacienda de Techachalco, de 1876 (Fig. 1.4).

Respecto a las evidencias arqueológicas en Alchichica, no se han registrado vestigios, no obstante, en el año 2004, se realizaron trabajos de prospección por los contornos del cráter e inmersiones en sus aguas por parte del Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH). Cabe mencionar que durante años, Alchichica ha sido un lugar idóneo por su cercanía con la Ciudad de México para practicar el buceo deportivo de altitud en sus frías aguas que son un reto para quienes practican esta especialidad.

A pesar de que Alchichica no ha presentado material arqueológico, otras lagunas de la parte central de la cuenca Lacustre Oriental, han sido investigadas de manera preliminar por personal de la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH. En 2016, fueron inspeccionadas las lagunas de Atexcac, la Preciosa y en Quechulac se realizó una inmersión (Junco y Hernández 2016). Éstas guardan similitudes con la laguna de Alchichica y es probable que compartan rasgos arqueológicos que vale la pena mencionar. Como el caso del xalapazco de Atexcac, que se sitúa en el extremo suroeste de la sierra de Techachal-

co, un cráter con elevaciones que varían de entre 60 y 130 metros de altura sobre el nivel del valle.

Las paredes presentan una inclinación abrupta que forma un sistema circular de acantilados o escarpes que dificultan la bajada al cuerpo de agua. Su extensión máxima es de 780 m y tiene una profundidad estimada de 40 m en su parte más honda. En Atexcac, durante la prospección, no se registraron materiales arqueológicos en las orillas, aunque no se descarta que tal vez existan evidencias sumergidas, pues Valencia (2011) reporta en los alrededores fragmentos de cerámica y lítica.

Respecto a la laguna La Preciosa, que se localiza 7 km al sur del poblado de Alchichica, su forma irregular que asemeja un triángulo con una longitud máxima de 1300 m y crestas que alcanzan 50 m de altura sobre el espejo de agua. Tiene una profundidad estimada de 45 m.

Durante el recorrido de superficie se identificaron en la parte norte algunos tepalcates relacionados con la cerámica de la zona arqueológica de Cantona para el Preclásico Tardío y Principios del Posclásico Temprano así como restos de obsidiana. En lo que toca a la laguna de Quechulac, esta se encuentra a tan solo 2.5 km al este de La Preciosa, muy cerca del poblado de Santa Cruz, presenta una longitud máxima de 983 m de ancho, así como una profundidad máxima de 40 m. En la sección noreste del lago, existe un islote pequeño en el cual hay una cruz de madera, lo cual le confiere características rituales, ya que el día de la



Figura 1.3. Fragmento del plano orográfico de la zona recorrida por el ferrocarril mexicano, 1877. Antonio García Cubas, donde se destacan los lagos Alchichica y La Preciosa Mineral.

Santa Cruz los lugareños llevan ofrendas a la isla al inicio de la temporada de lluvias. Debido al carácter ritual de la isla, se realizó buceo en esta zona sin encontrar restos de material arqueológico hasta los 11 metros de profundidad. Sin embargo la sedimentación de la laguna no permite saber si hay material a simple vista. En el recorrido de superficie por la cresta del cráter, se localizó cerámica del Preclásico Medio hasta finales del Clásico e inicio del Posclásico. También se identificó obsidiana proveniente del Pico de Orizaba. En la actualidad resulta interesante valorar cómo la sacralidad del lago Alchichica trasciende más allá de sus contornos, sucede que en la población de Xico (recuérdese la ruta de Cortés) se elabora un arco floral cada 22 de julio para con-

memorar la fiesta patronal de Santa María Magdalena. Un grupo de creyentes parte al lago Alchichica una semana antes de que empiece la celebración con el objetivo de conseguir la flor de cucharilla.⁹ La salida se programa para las dos de la mañana; antes de partir oran y piden a la Patrona de Xico su ayuda para encontrar una buena cantidad de flores; a su regreso son esperados afuera de la iglesia por la Virgen; con las flores obtenidas se adorna un arco que es colocado a la entrada del templo. Debe mencionarse que las personas elegidas para ir a cortar las flores toman solamente alimentos de color blanco porque de lo contrario, según la creencia, la flor se marchitaría (Torres 2016).

⁹ La flor de cucharilla (*Dasyilirion acrotrichum*) es de crecimiento lento, pues desde la germinación de la semilla hasta la primera floración pueden transcurrir más de 12 años. La cucharilla se desarrolla en climas semiáridos y áridos. Por su lento crecimiento y la extracción con fines alimenticios y rituales con más de 100 arcos elaborados en el centro de Veracruz cada año, donde cada arco requiere de 240 plantas, la especie se encuentra amenazada según la Norma Oficial Mexicana NOM-059-SE-MARNAT-2010.



Figura 1.4. Fragmento del plano de la Hacienda de Techachalco, 1876. Colección Orozco y Berra, México, varilla CGPUE07, número clasificador 4182-CGE-7247-A, autor desconocido, técnica tela calca, calco del original del capitán 1º de artillería Juan Garrido.

El lago Alchichica continúa proveyendo de sacralidad a los feligreses y de historias que alimentan el imaginario colectivo. Se asumen nuevas memorias con las que se busca recalcar su importancia, se le envuelve de enigmas que cautivan a los más famosos exploradores marinos del mundo como Jacques Cousteau; son recurrentes los relatos donde se narra que se trata de un cuerpo de agua sin fondo que se comunica con el mar; es también el lugar de asombro por luces fugaces que se adentran en sus aguas, acaso evidencia de otra dimensión o de naves extraterrestres (OVNI) que resultan como explicación colectiva de

un reduccionismo psicosocial que obedece a la moderna era tecnológica y espacial avivada por la ciencia ficción del cine y la televisión. Al final de cuentas, el lago Alchichica es el reducto de lo extraordinario, no sólo imaginativo sino también natural, esto ha hecho de este axalapazco un sitio que no ha pasado desapercibido en la historia de nuestra nación y que, sin duda, seguirá fascinando nuestras emociones y relatos.

Agradecimientos

Se agradece al Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SAGARPA, la

reproducción digital del Plano de la Hacienda de Techachalco, Puebla, varilla CG-PUE07, con número de control 4182-CGE-7247-A, de autor anónimo, de 1876, correspondiente al Acervo de la Mapoteca “Manuel Orozco y Berra”. Los autores agradecen a la CONANP, en especial a la Dra. Gloria Fermina Tavera Alonso, Directora Regional del Centro y Eje Neovolcánico de la CONANP. Asimismo a Iris Hernández y Mateo Junco.

Referencias

- Alcedo, A. de. 1784. Diccionario geográfico-histórico de las Indias Occidentales o América. Tomo I. Imprenta Benito Cano. Madrid, España.
- Alcocer Durand, J. 2013. Una perla en el desierto mexicano. *Gaceta de la Unión Geofísica Mexicana* III (12): 9-15.
- Fabián & Fuero, F. 1770. Colección de providencias diocesanas del obispado de Puebla de los Ángeles hechas y ordenadas por su Señoría Ilustrísima el Sr. D. Francisco Fabián y Fuero obispo de dicha ciudad y obispado del Consejo de su Majestad, Imprenta del Real Seminario Palafoxiano, Puebla de los Ángeles.
- Gallego-Gredilla, J. A. 2000. Sigüenza y don Juan de Palafox. En: Palafox: Iglesia, cultura y Estado en el siglo XVII. Congreso Internacional IV Centenario del Nacimiento de Don Juan de Palafox y Mendoza, Universidad de Navarra, España, 93-127.
- García-Cubas, A. 2015. Diccionario geográfico, histórico y biográfico de los Estados Unidos Mexicanos. Primera edición facsimilar, Instituto Nacional de Estadística y Geografía, UNAM y El Colegio Nacional, México.
- García-Ulloa, L. 2011. Ubicación y tiempo de un sitio prehispánico en la región del Cofre de Perote. Tesis de licenciatura en Arqueología, Facultad de Antropología, Universidad Veracruzana, Xalapa, México.
- Gibson, C. 1984. Los aztecas bajo el dominio español (1519-1810), Siglo XXI Editores. Ciudad de México, México.
- von Humboldt, A. 2011. Selections from the Works of the Baron de Humboldt: Relating to the Climate, Inhabitants, Productions, and Mines of Mexico, *Cambridge University Press*, Nueva York, EE. UU.
- Junco, R. & Hernández I. 2016. Informe de visita de inspección a los axalapazcos de la Cuenca Oriental. Mecanuscrito de la Subdirección de Arqueología Subacuática del INAH. Ciudad de México, México.
- Macazaga-Ordoño, C. 1979. Nombres geográficos de México. Editorial Innovación. Ciudad de México, México.
- Martínez-Baracs, A. 2009. El mapa de Cuauhtinchan. *Letras Libres* 130. Sección Letrillas. Editorial Vuelta. Ciudad de México, México.
- Martínez, J. 2014. Documentos cortesianos, I: 1518-1528. Secciones I a III, edición de José Luis Martínez, Fondo de Cultura Económica y UNAM. Ciudad de México, México.
- Miralles, J. 2010. Las cinco rutas de Hernán Cortés, Fomento Cultural de Grupo Salinas. Ciudad de México, México.
- Montero-García, I. 2014. Primeros apuntes para el estudio arqueoastronómico de Cantona, Puebla. *Arqueología* 48: 123-136.
- Ramírez de Alba, H. 2013. A pie por la ruta de Cortés. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, México.
- Solís, A. de. 1844. Historia de la conquista de México: población y progresos de la América septentrional, conocida por el nombre de Nueva España. Vol. 4. Casa Editorial Garnier Hermanos. París, Francia.
- Tapia, A. de. 1866. Relación hecha por el señor Andrés de Tapia sobre la conquista de México, en Colección de documentos para la historia de México, publicada por Joaquín García Icazbalceta, Portal de Agustinos, México.

- Thomas, H. 1995. *Conquest: Cortes, Montezuma, and the fall of old Mexico*. Simon and Schuster Paperbacks. Nueva York, EE. UU.
- de Torquemada, fray J. 1977. *Monarquía Indiana*, editado por la UNAM. Ciudad de México, México.
- Torres-Martínez, G. 2016. Manejo tradicional de *Dasyllirion acrotrichum* (Schiede) Zucc (Asparagaceae) para la elaboración de arcos florales en el centro de Veracruz y la evaluación del impacto en sus poblaciones naturales. Tesis de Maestría en Ecología Tropical. Universidad Veracruzana, Xalapa, México.
- Tucker, T. 2008. Una nueva propuesta de orientación y cartografía para el Mapa de Cuauhtinchan II. En: Mapa de Cuauhtinchan II. Tim Tucker y Arturo Montero (coord.). *Entre la ciencia y lo sagrado*. Mesoamerican Research Foundation. Puebla, México.
- Valencia-Laurel, A. 2011. Informe técnico del Proyecto Norte de la Cuenca Oriental, temporada 2011. Mecanuscrito, INAH. Ciudad de México, México.
- Velarde-Mendoza, T. 2012. Importancia ecológica y cultural de una especie endémica de ajolote (*Ambystoma dumerilii*) del Lago de Pátzcuaro, Michoacán. *Etnobiología* 2: 40-49.
- Yoneda, K. 1991. Los mapas de Cuauhtinchan y la historia cartográfica prehispánica. Fondo de Cultura Económica. Archivo General de la Nación y el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. Ciudad de México, México.
- Yoneda, K. 2005. Mapa de Cuauhtinchan núm. 2. Grupo Editorial Miguel Ángel Porrúa y el CIESAS. Ciudad de México, México.
- Roberto E. Junco Sánchez.** Subdirección de Arqueología Subacuática, INAH. Moneda 16, Colonia Centro, A. Cuauhtémoc, C.P. 06010.

Contacto

Ismael A. Montero García. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas. Región Centro y Eje Neovolcánico. Tabachín 55, esquina Llamarada, Bellavista, Cuernavaca, Morelos, México, C.P. 62170.
ismael@montero.org.mx





Origen y formación del cráter

Gerardo Carrasco-Núñez

México es un país con una riqueza geológica inigualable, uno de sus rasgos característicos es el paisaje espectacular que muestran sus volcanes con diversidad de formas y tamaños, reflejo de la complejidad de procesos naturales geológicos que han modelado la superficie terrestre a través del tiempo. La parte central de México es atravesada desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México por una cadena montañosa volcánica conocida como Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), formada hace aproximadamente 15 millones de años (Ma) y que continúa activa hasta nuestros días. Aunque el origen ha sido materia de debate, existe consenso acerca de su relación con los procesos de subducción en los que la placa tectónica de Cocos se sumerge por debajo de la placa tectónica norteamericana, para generar el vulcanismo que conforma el CVTM (Ferrari *et al.* 1999).

El CVTM está integrado por miles de volcanes con tipos de erupción, composición, formas y tamaños diversos que cubren prácticamente toda la gama de estructuras volcánicas posibles. De manera particular, existe un tipo de vulcanismo muy característico que se forma en pequeños campos volcánicos bajo condiciones especiales en donde el magma, durante su ca-

mino ascendente desde cierta profundidad hacia la superficie terrestre, interactúa con agua externa, procedente ya sea de aguas subterráneas o de cuerpos de agua superficiales, provocando un proceso de explosividad extrema que da lugar a la formación de un cráter con la emisión de productos eruptivos con un grado extremo de fragmentación, que en conjunto conforman un volcán tipo *maar*. Estos volcanes son conocidos en México (particularmente en el estado de Puebla) como xalapazcos, descritos así desde el trabajo pionero de Ordóñez (1906), y denominados como axalapazcos cuando contienen un lago en el interior de su cráter, aunque en otras zonas como San Luis Potosí son conocidos como “joyas”, o bien como “hoyas” en el campo de Valle de Santiago (estado de Guanajuato).

En el sector oriental del CVTM se ubica la cuenca de Serdán-Oriental (Fig. 2.1), un rasgo fisiográfico con una morfología de valles, típica del altiplano central del país, rodeado por sierras dominadas por cadenas volcánicas. En esta cuenca se ha desarrollado un vulcanismo distribuido aleatoriamente y de manera discreta que incluye numerosos xalapazcos y axalapazcos, además de otras formas volcánicas (por ejemplo, domos: cuerpos de lava muy

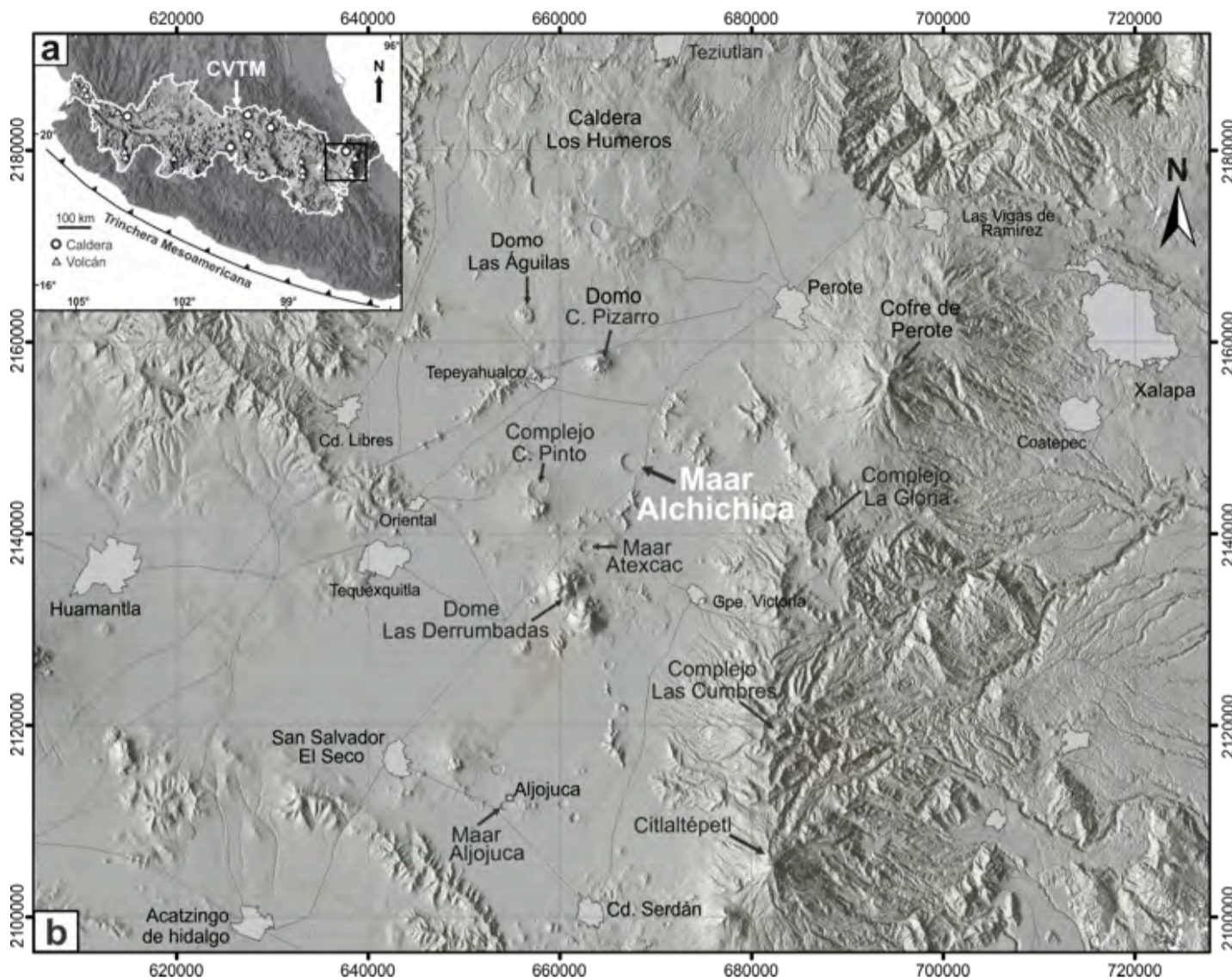


Figura 2.1 Localización del cráter Alchichica en el sector oriental del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano, dentro de la Cuenca de Serdán-Oriental. (Figura: Gerardo Carrasco-Núñez).

viscosa y conos cineríticos: conos formados por ceniza volcánica), que caracterizan esta zona.

Uno de los rasgos más prominentes de ese campo volcánico está representado por el cráter Alchichica. Éste destaca por tener un perfil asimétrico con un relieve mayor hacia el borde occidental (Fig. 2.2) y por ser el de mayor tamaño de la cuenca con un diámetro máximo de 1.7 km orientado el NO-SE y un volumen de 94,214,080 m³ (Filonov *et al.* 2006). Además de contener un lago con una profundidad media de 40.9 m y 62 m de profundidad máxima (Fig. 2.3). Enseguida se presentan las carac-

terísticas geológicas generales del cráter Alchichica que permiten establecer de manera sintetizada su evolución vulcanológica, basada en la descripción de sus características y posición relativa, a partir de los cuales es posible establecer la cronología de los eventos vulcanológicos que presumiblemente ocurrieron en el pasado.

Contexto geológico regional

Alchichica se encuentra en la porción centro-septentrional de la Cuenca Serdán-Oriental, la cual se ubica en la confluencia entre las grandes provincias geológicas de

la Sierra Madre Oriental (SMO) y el Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM).

Las rocas más antiguas de la región están representadas por un basamento compuesto por rocas metamórficas (rocas que se han transformado de su composición y estructura original debido a altas presiones y temperaturas a profundidad) e intrusivas (cuerpos de magma o roca fundida que no llegan a aflorar en superficie) que incluyen esquistos verdes (rocas metamórficas formadas a bajas temperaturas y presiones), granodioritas (rocas intrusivas de composición intermedia en sílice) y granitos (rocas intrusivas ricas en sílice) de edad Paleozoica (207-181 Ma) que integran el Macizo de Teziutlán (Viniestra 1965, Yáñez y García 1980) al norte de la cuenca. Esta zona está cubierta por una importante secuencia de rocas sedimentarias con más de 3,000 m de espesor, de edad Mesozoica, dominada por calizas y, en menor proporción, por lutitas, fuertemente plegadas y falladas (Reyes 1979, Yáñez y García 1980). La SMO está expuesta en los extremos de la cuenca con una orientación Noroeste-Sureste (NO-SE), y dentro de la cuenca afloran en forma de pequeñas ventanas, formando las rocas del basamento que subyace a toda la cuenca. Existen en la zona pequeños cuerpos aislados que corresponden a intrusiones de granodiorita y sienita (rocas intrusivas con un alto contenido en sílice y potasio) de edad terciaria (14.5 y 31 Ma; Yáñez y García 1980).

El inicio del vulcanismo en la región está representado por la emisión de lavas

andesíticas (de composición intermedia en sílice) de edad Miocénica (8.9 a 11.0 Ma; Carrasco-Núñez *et al.* 1997) que se asocian a la actividad del complejo volcánico Cerro Grande, el cual aflora al oeste de la Cuenca. Asimismo, se presenta un vulcanismo andesítico abundante en el intervalo de 1.4 a 2.6 Ma (Yáñez y García 1980, Ferriz y Mahood 1984, Carrasco-Núñez 2017), que se identifica en los pozos geotérmicos del complejo volcánico de Los Humeros (al norte de la Cuenca Serdán-Oriental) y expuesto en algunos de los lagos cráter de la Cuenca (Carrasco-Núñez *et al.* 2014).

Serdán-Oriental es una cuenca cerrada (endorreica, es decir, sin conexión superficial con el mar ni con otra cuenca vecina) que se caracteriza por carecer de ríos y canales bien definidos, debido principalmente a la alta permeabilidad (infiltración) de los productos piroclásticos (fragmentos derivados de erupciones explosivas) que cubren la zona, ya que fueron ampliamente dispersados por la intensa actividad explosiva derivada por los múltiples volcanes de los alrededores. El agua disponible es esencialmente subterránea, a poca profundidad, lo que le permite quedar expuesta a través de los cráteres volcánicos de explosión o axalapazcos (Ordóñez 1906), que indican el nivel freático (del agua subterránea) regional.

La cuenca Serdán-Oriental está caracterizada por un vulcanismo de naturaleza monogenética, es decir, volcanes producidos comúnmente por un solo evento eruptivo y



Figura 2.2. Fotografía que muestra la asimetría geomorfológica con el relieve elevado del flanco occidental del cráter. Las flechas indican el contacto entre las rocas previas a la formación de las secuencias formadoras del axalapazco Alchichica (abajo) con las que las cubren (arriba). (Fotografía: Gerardo Carrasco-Núñez).

de corta duración (meses, años o decenas de años). Ese vulcanismo es de composición bimodal, lo que implica presentar composiciones diferentes que incluyen, por un lado, grandes domos de composición riolítica (ricos en sílice) que contrastan con pequeños conos de lava y escoria (fragmentos porosos derivados de erupciones explosivas de composición basáltica), así como con xalapazcos de composición tanto basáltica (pobres en sílice) como riolítica.

De acuerdo con Gasca-Durán (1982), los xalapazcos o axalapazcos se dividen en 3 grupos según su posición geográfica en la

cuenca y se encuentran en Alchichica en el grupo norte.

A pesar de que Alchichica es uno de los volcanes tipo *maar* (axalapazco) más grandes de México, los estudios publicados hasta la fecha sobre su evolución geológica son muy limitados, aparte de algunos trabajos regionales que explican de manera general la geología de la Cuenca Serdán-Oriental (Reyes 1979, Yáñez-García 1980, Negendank *et al.* 1985 y Carrasco-Núñez *et al.* 2012), y algunos más específicos sobre los xalapazcos de la región que describen sus rasgos morfológicos y geología general (Ordoñez 1904,

Gasca-Durán 1982, Carrasco-Núñez *et al.* 2014). Solamente un estudio reciente describe la evolución general del cráter de Alchichica (Chako-Tchambe *et al.* en revisión).

Evolución geológica

Tipo de volcán, procesos y depósitos geológicos asociados

El término *xalapazco* proviene de vocablos derivados de la lengua náhuatl que significan “arena contenida en una vasija”, es decir el término tiene implicaciones genéticas (relacionadas con el origen de la estructura) que se asocian a una intensa actividad explosiva resultado de la interacción magma (roca fundida) agua, capaz de producir una acentuada fragmentación de los productos eruptivos generados, con materiales que comúnmente tienen el tamaño de la arena (entre ~ 0.1 y 2 mm). En sentido estricto, Alchichica es un *axalapazco* (el prefijo “*a*”, del náhuatl “*atl*” implica presencia de agua), al poseer un lago en el interior del cráter.

Asimismo, el término *maar*, definido originalmente en Alemania, es aplicado en sentido estricto a volcanes que resultan de erupciones altamente explosivas de tipo freático (interacción de calor con agua) o freatomagmáticas (interacción entre magma ascendente con agua) que exponen a las rocas preexistentes al *maar*, también conocidas como roca encajonante sobre la cual se construye el *axalapazco*. Existen otras estructuras, como son los anillos de tobas (cráteres formados por cenizas volcánicas con pendientes suaves, $<30^\circ$) o los conos de tobas (cráteres formados por cenizas volcánicas con pendientes fuertes, $>30^\circ$), cuya formación depende de la relación agua-magma involucrada (Wohletz y Heiken 1992). En el caso de Alchichica, las rocas preexistentes (unidades de roca pre-*axalapazco* o pre-*maar*) están expuestas en su flanco occidental (Fig. 2.3); sin embargo, en el resto del cráter sólo aflora la secuencia *axalapazco* (*maar*), que se caracteriza por presentar un relieve con pendientes suaves.



Figura 2.3. Fotografía panorámica que muestra la morfología interior del cráter Alchichica; a mano izquierda se observa el contacto entre los depósitos de *maar* que cubren a una secuencia de rocas y depósitos preexistentes. Al fondo apenas se observa la silueta de la cadena Cofre de Perote (CP)-La Gloria (LG)-Las Cumbres (LC), al oriente de Alchichica, indicado con flechas. (Fotografía: Gerardo Carrasco-Núñez).

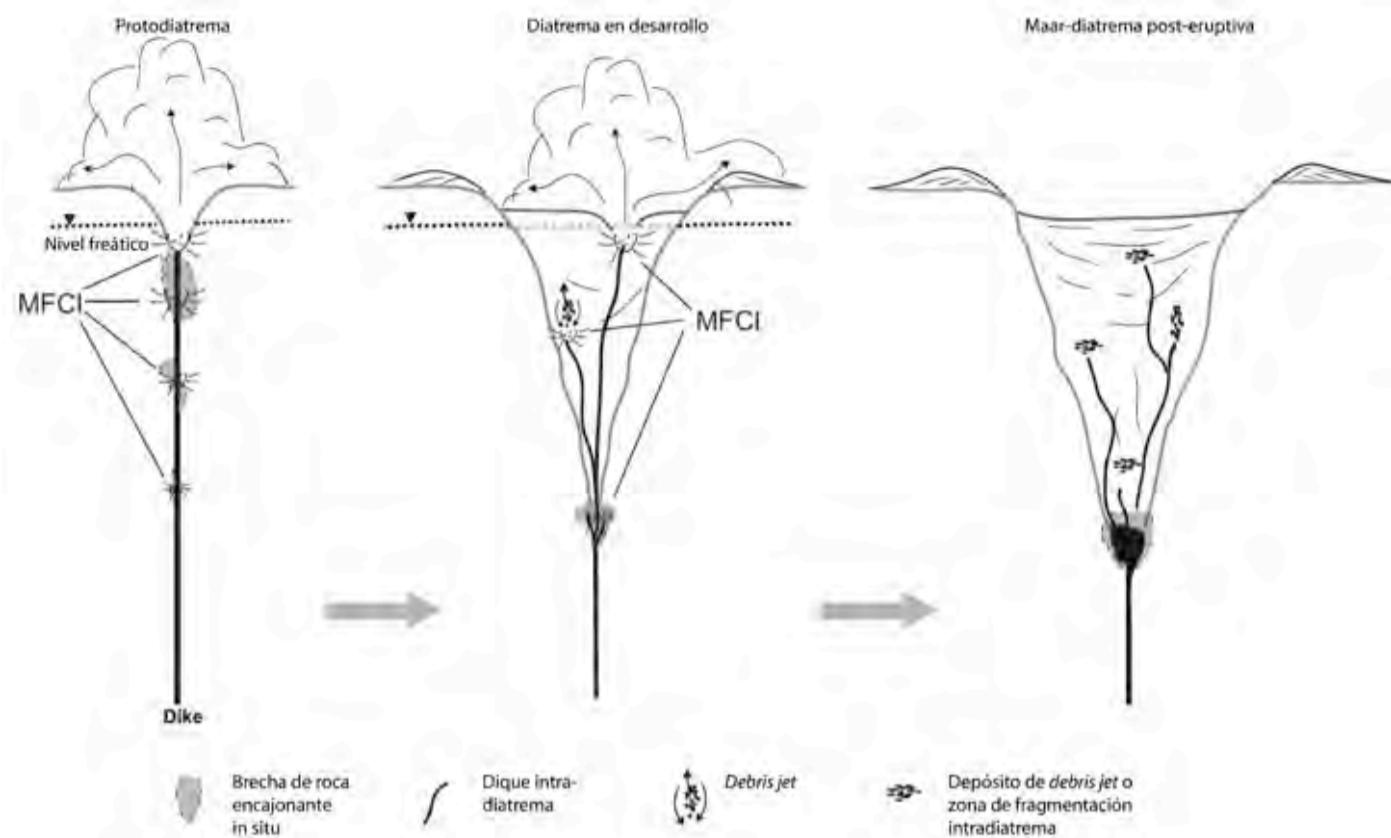


Figura 2.4. Modelo de formación de un volcán tipo *maar* (xalapazco) propuesto por Valentine y White (2012) y modificado de De León (2016). MFCI (Molten Fuel Coolant Interaction) por sus siglas en inglés que significa “Interacción combustible fundido-refrigerante”. (Figura: Gerardo Carrasco-Núñez).

El origen de los xalapazcos (*maars*) está asociado a dos modelos genéticos principales. El modelo de Lorenz (1986) considera un ensanchamiento paulatino del cráter ocasionado por una profundización progresiva del centro de las explosiones, mediante un proceso de interacción entre un combustible fundido —que sería el magma— y un agente refrigerante que sería el agua (*Molten Fuel Coolant Interaction*, MFCI por sus siglas en inglés), en donde una parte del material es expulsado hacia afuera del cráter, mientras que una parte importante regresa y rellena el hueco formado por las explosiones y deja una estructura denominada diatrema. Un modelo más reciente, propuesto por Valentine y White (2012), propone que el magma, al ascender a través de una frac-

tura experimenta explosiones MFCI en diferentes niveles con el tiempo, sin seguir un orden sistemático como en el modelo anterior, pero que usualmente ocurren a profundidades menores a 2 km (y que, de hecho, son más efectivas en niveles menos profundos, inferiores a 1 km), y causan un crecimiento progresivo del cráter conforme las explosiones van fragmentando la roca encajonante a través de la súbita expulsión de fragmentos (*debris jet*) hacia la superficie, y su eventual depósito en diferentes niveles de la diatrema o relleno del cráter (Fig. 2.4).

Por lo que respecta al tipo de depósitos asociados a estos volcanes, es característico encontrar una alternancia de depósitos piroclásticos (fragmentos eruptivos porosos) generados por una actividad intermitente de

explosiones freáticas. Éstas se generan como resultado del calentamiento súbito de un acuífero o cuerpo de agua, y/o freatomagmáticas producido por la interacción del magma ascendente con agua externa y generan la violenta expulsión de nubes piroclásticas que fluyen de manera radial y sobre la superficie del terreno a velocidades por encima de los 200 km h⁻¹. Esta actividad típicamente forma una sucesión de decenas a cientos de capas muy finas que representan, cada una de ellas, una explosión instantánea, de tal manera que en un lapso de unos cuantos minutos se pueden acumular decenas de capas que conforman una secuencia eruptiva. Esos depósitos de nube piroclástica alternan con capas originadas por la caída de piroclásticos generadas por columnas eruptivas de poca altura. En ocasiones son emitidos también grandes bloques de roca dominados por lavas andesítico-basálticas que viajan como proyectiles balísticos y son depositados en las cercanías del punto de emisión, procedentes de las rocas que atraviesa la columna eruptiva durante su ascenso a la superficie.

Ocasionalmente ocurren erupciones magmáticas o secas, ya que tienen poca o nula interacción con agua externa; las más comunes son las erupciones estrombolianas (de baja explosividad) formadoras de columnas eruptivas pequeñas y efímeras que arrojan materiales vesiculados (con burbujas) en los alrededores del punto de emisión.

Secuencia de eventos (estratigrafía)

El registro de las secuencias de rocas y depósitos que se encuentran sepultados en el sector occidental del cráter Alchichica son una muestra de la actividad volcánica ocurrida en la región mucho antes de la formación del axalapazco Alchichica. Bajo este esquema, es posible identificar dos grupos distintos de secuencias que corresponden a la actividad pre-axalapazco (*pre-maar*) y la secuencia axalapazco (*maar*) (Fig. 2.5).

Secuencia pre-axalapazco (maar)

Esta secuencia incluye flujos de lava, paleosuelos y diversos depósitos piroclásticos, para destacar entre ellos un depósito estratificado compuesto de pómez (material poroso asociado a erupciones explosivas) de composición riolítica, muy distintos a la composición del axalapazco (andesítico-basáltica). El flujo de lava que aparece en la base de esta secuencia es de composición andesítico-basáltica y está integrado por varias unidades de flujo, que sólo aparecen en el flanco NO del cráter. Sobre esta secuencia pre-axalapazco se construyó un cono de escorias hacia el sector occidental del cráter (Fig. 2.6 A), lo que le da la peculiar asimetría al cráter, característica de Alchichica. Esta secuencia representa múltiples eventos de emisión volcánica derivados de diferentes bocas eruptivas originadas en distintos tiempos, por lo cual se consideran como totalmente independientes a la formación de las secuencias formadoras del *axalapazco* Alchichica; así, por ejemplo, los depósitos

de pómez riolítica se han logrado correlacionar, tanto en composición como en edad, con depósitos asociados a la actividad del domo riolítico del Cerro Pizarro hace 116,000 años (Chako-Tchambe *et al.* en revisión).

La única excepción es el cono de escorias que se encuentra en contacto directo con la secuencia inferior formadora del axalapazco. En ese contacto, justo en la transición de las erupciones netamente magmáticas asociadas a erupciones estrombolianas con las erupciones freato-magmáticas (agua-magma) formadoras del axalapazco, se aprecia un depósito de ce-

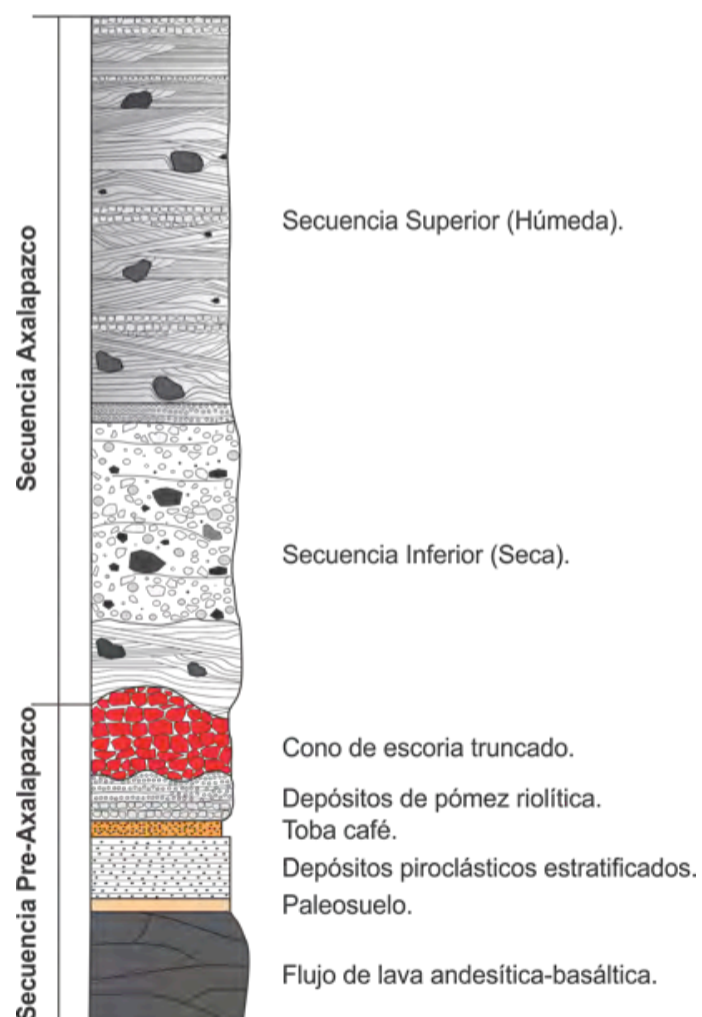


Figura 2.5. Esquema general de la secuencia estratigráfica relativa (no a escala) que muestra los diferentes depósitos representativos de los principales eventos eruptivos que formaron el cráter Alchichica (concordante con el modelo propuesto por Chako-Tchambe *et al.* 2018). (Esquema: Gerardo Carrasco-Núñez).

niza de color café (Fig. 2.6 B), reflejo de la fase de alta fragmentación ocasionada por una explosión freática; lo anterior representa un cambio del proceso eruptivo, con el ingreso de agua al sistema que modifica drásticamente las condiciones que dan inicio a la formación del axalapazco.

Secuencia axalapazco (maar)

Esta secuencia puede ser dividida en dos unidades: la secuencia inferior que sobryace directamente tanto a los depósitos de escoria del cono del sector occidental, como a las rocas lavas andesítico-basálticas más antiguas.

La secuencia inferior está compuesta por una alternancia de depósitos masivos y estratificados en capas delgadas (Fig. 2.7 A), dominadas por ceniza volcánica con un alto contenido en material rocoso derivado de la intensa fragmentación de las capas subyacentes, y en menor proporción, por material de magma nuevo, que se transporta como una nube que viaja a gran velocidad en todas direcciones en torno al cráter.

La base de esta secuencia muestra un grado acentuado de consolidación que le otorga una mayor consistencia, la cual se atribuye al proceso de alteración que se da durante la súbita hidratación del material piroclástico emitido durante el proceso eruptivo.

En algunos horizontes se observan bloques de roca de tamaños decimétricos que notoriamente no causaron una deformación significativa en las capas sobre las



Figura 2.6. Fotografías del sector occidental del cráter. A) Contacto entre el cono de escoria de color rojizo sobreyacido por las capas endurecidas de la secuencia estratificada tipo *maar*. B) Detalle que muestra el contacto entre la escoria basáltica (en rojo) y la parte basal (en gris) que indica el inicio de la secuencia maar, separados por una capa delgada de ceniza (Fotografía: Gerardo Carrasco-Núñez).

que fueron impactados, lo cual indica que, en términos generales, dichas capas tenían poca humedad (Fig. 2.7 B).

La secuencia superior está compuesta, de manera similar a la inferior, por una alternancia de capas estratificadas y depósitos masivos generados por nubes de ceniza y, en menor proporción, depósitos de caída aérea. La diferencia con la secuencia inferior se ve reflejada en las estructuras que caracterizan esta secuencia, como son la deformación notoria de las capas, mostrada por el plegamiento intenso de las estructuras de impacto ocasionado por los bloques balísticos (Fig. 2.8 A), así como por la presencia de partículas denominadas lapilli acrecional (pequeñas esferas que rodean a un núcleo central, originadas por la dinámica del flujo que las transporta en presencia de humedad) (Fig. 2.8 B).

Ambas características son evidencia clara de una mayor cantidad de agua involucrada durante su formación, en contraste con las capas de la secuencia superior.

Reconstrucción de la historia eruptiva del cráter Alchichica

La columna geológica identificada en el cráter de Alchichica permite distinguir claramente dos diferentes etapas en su formación. Una etapa pre-axalapazco (pre-*maar*) que consiste en el emplazamiento inicial de flujos de lava de composición andesítico-basáltica cuyo punto de emisión es desconocido, aunque se sospecha que pudiera provenir de las cercanías del sector occidental del cráter. La siguiente etapa corresponde a un periodo de reposo, representado por un paleosuelo bien desarrollado que indica un tiempo de varios miles o hasta decenas de miles de años. Esta fase de reposo fue interrumpida por actividad explosiva que generó el depósito de una secuencia estratificada cuyo origen es desconocido, ya que la fuente se encuentra sepultada por los depósitos subsecuentes. Posteriormente se depositó la “toba café”, una capa “misteriosa” que aparece en amplios sectores del

centro de México, atribuida a actividad muy explosiva que emitió grandes cantidades de cenizas, transportadas por una intensa actividad eólica en el tiempo de su emisión. Después de esto, ocurrió la reactivación del Cerro Pizarro a través de erupciones muy explosivas, con una clara componente freatomagmática asociada a la emisión de nubes piroclásticas que alcanzaron la localidad de Alchichica hace aproximadamente 116,000 años (Chako-Tchambe *et al.* en revisión), lo cual se confirma por la correlación que se hace en cuanto al tipo de depósitos identificados, su composición y su edad (Carrasco-Núñez *et al.* 2008).

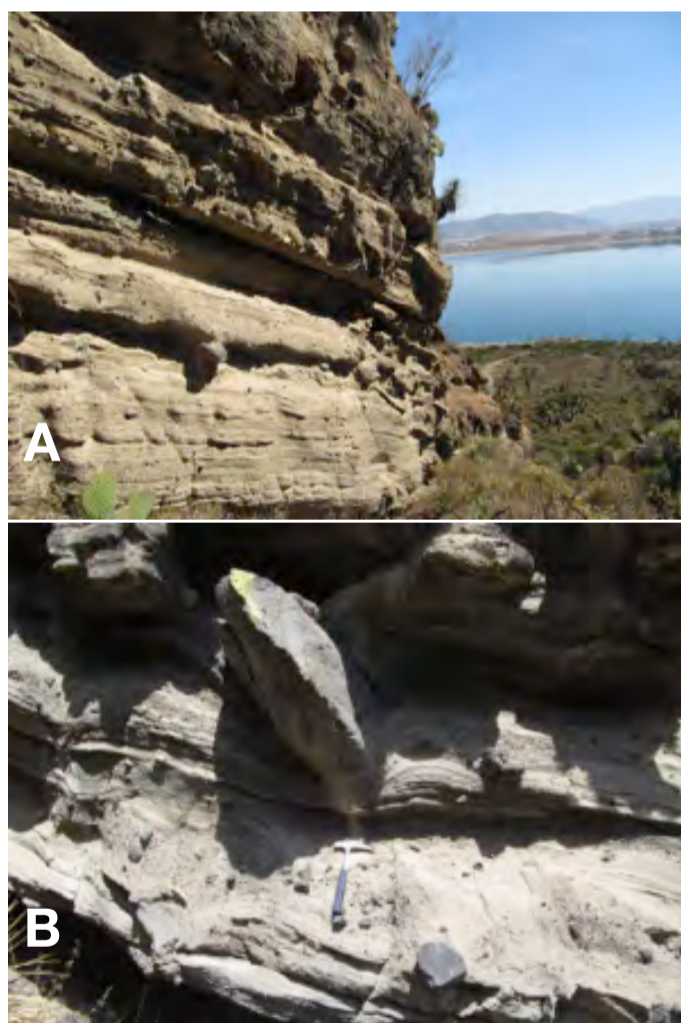


Figura 2.7. Fotografías que muestran las características de la secuencia inferior. A) Detalle de estratificación de las capas de la base de la secuencia. B) Detalle que muestra la intercalación de depósitos masivos y estratificados, así como la deformación incipiente ocasionada por bloques balísticos. (Fotografía: Gerardo Carrasco-Núñez).

Se infiere la existencia de otras litologías a mayor profundidad, tales como calizas y areniscas, que a pesar de que no afloran en el cráter, sí se encuentran expuestas en los alrededores, aparecen también en los componentes fragmentarios que integran los depósitos de las secuencias características del axalapazco.

La última fase, anterior a la formación del axalapazco Alchichica, corresponde a la construcción de un cono de escorias (volcán pequeño compuesto por fragmentos porosos asociados particularmente a erupciones estrombolianas) de medianas proporciones en el sector occidental del actual cráter (Fig. 2.9 A), que representa el inicio de una actividad magmática durante el Pleistoceno tardío-Holoceno temprano (alrededor de hace unos 12,000 años), de acuerdo con Chako-Tchambe *et al.* (en revisión).

Dicha actividad está asociada a erupciones estrombolianas intensas que, de manera pulsante, depositan progresivamente el material escoriáceo que va cayendo a partir de pequeñas columnas eruptivas, que llegan a alcanzar algunos centenares de metros. Se infiere una inyección posterior de magma, que durante su ascenso a la superficie a través de fisuras de pequeño espesor generaron un acentuado fracturamiento. Este proceso permitió el ingreso de agua externa al sistema, muy posiblemente a través de un acuífero relativamente somero, que genera una intensa interacción tipo *MFCI*, entre el magma ascendente y el agua subterránea. Esto provoca la conversión instantánea de energía térmica en mecánica, lo

cual genera un fracturamiento extremo de la roca encajonante que forma parte del subsuelo de la zona. Los componentes expulsados violentamente viajan como ráfagas que se desplazan de manera radial, como pulsos instantáneos que configuran la sucesión de capas que conforman secuencia inferior (Fig. 2.9B). Adicionalmente, se infiere que otros fragmentos no fragmentados de manera eficiente viajaron por el aire siguiendo trayectorias balísticas cuyo desplazamiento dependió de su tamaño, densidad y de la trayectoria con que fueron expulsados. A pesar de que estas erupciones son clasificadas como freatomagmáticas, con un fuerte componente de mezcla de magma con agua, los depósitos resultantes no son demasiado húmedos como se puede inferir a partir de las estructuras que lo forma. Conforme evolucionó la erupción, que pudo durar apenas unas horas o días, el cráter inicialmente formado se fue ensanchando, y destruyó parcialmente el cono de escorias (Fig. 2.9 B), al tiempo que los focos eruptivos fueron cambiando de posición de acuerdo con las características heterogéneas del medio en donde ocurrieron, y aunque pudo variar en profundidad, probablemente resultaron explosiones someras que llegaron a alcanzar la superficie. Evidentemente, una gran parte del material eyectado regresó posteriormente al interior del cráter, lo relleno y formó lo que se conoce como una diatrema, o depósito caótico de bloques de roca que raras veces queda expuesto a la superficie (Fig. 2.4), a menos de que se trate de estructuras muy antiguas

expuestas, con el paso del tiempo, por la erosión.

La ampliación del cráter y el debilitamiento subsecuente de la estructura interna de la diatrema fueron posiblemente factores importantes que indujeron una incorporación mayor de agua al sistema, con lo cual se originaron erupciones con mayor humedad, tal como quedó reflejado en las secuencias eruptivas resultantes (Fig. 2.9 C), las cuales fueron acompañadas por un nuevo ensanchamiento del cráter, modificando progresivamente la configuración del mismo hasta llegar a su forma actual.

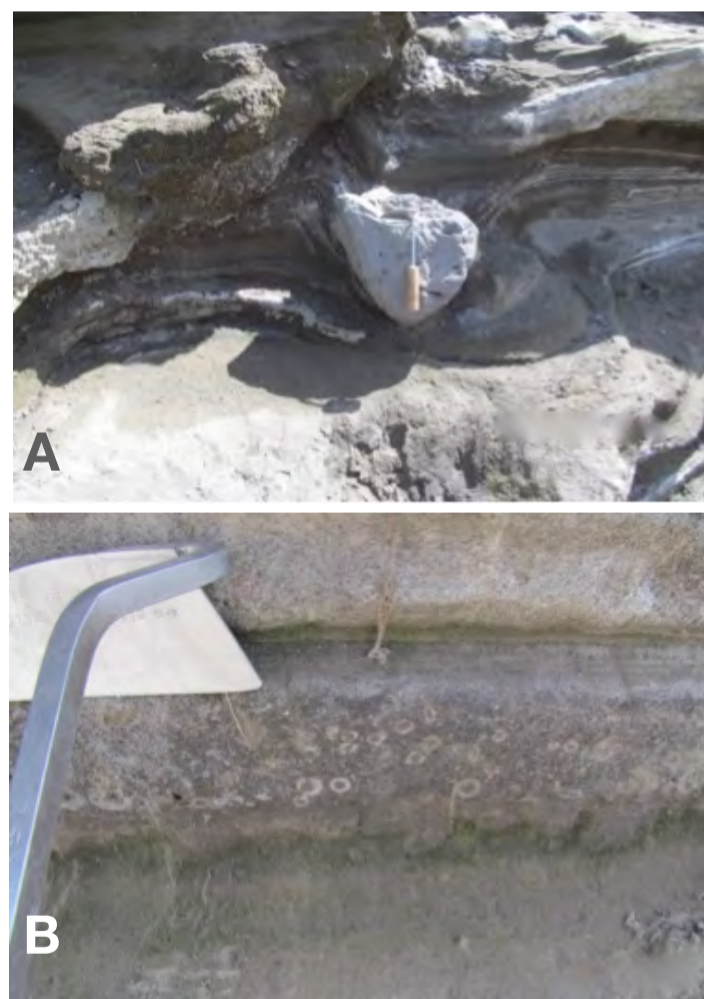


Figura 2.8. Fotografías que muestran los depósitos representativos de la secuencia superior. A) Capas estratificadas demuestran intensa deformación por la caída de bombas balísticas, en contraste con la observada en la Fig. 7B. B) Detalle donde se observan pequeñas partículas semiesféricas con un núcleo central, conocidas como estructuras de lapilli acrecional que indican condiciones de humedad de los depósitos de la secuencia superior. (Fotografía: Gerardo Carrasco-Núñez).

Es posible que el lago existente actualmente en el interior del cráter haya sido formado desde tiempos ancestrales durante el Holoceno (hace unos 11,700 años) con fluctuaciones importantes en sus niveles de agua, tal como se observa en el presente, con un descenso significativo del nivel promedio del agua.

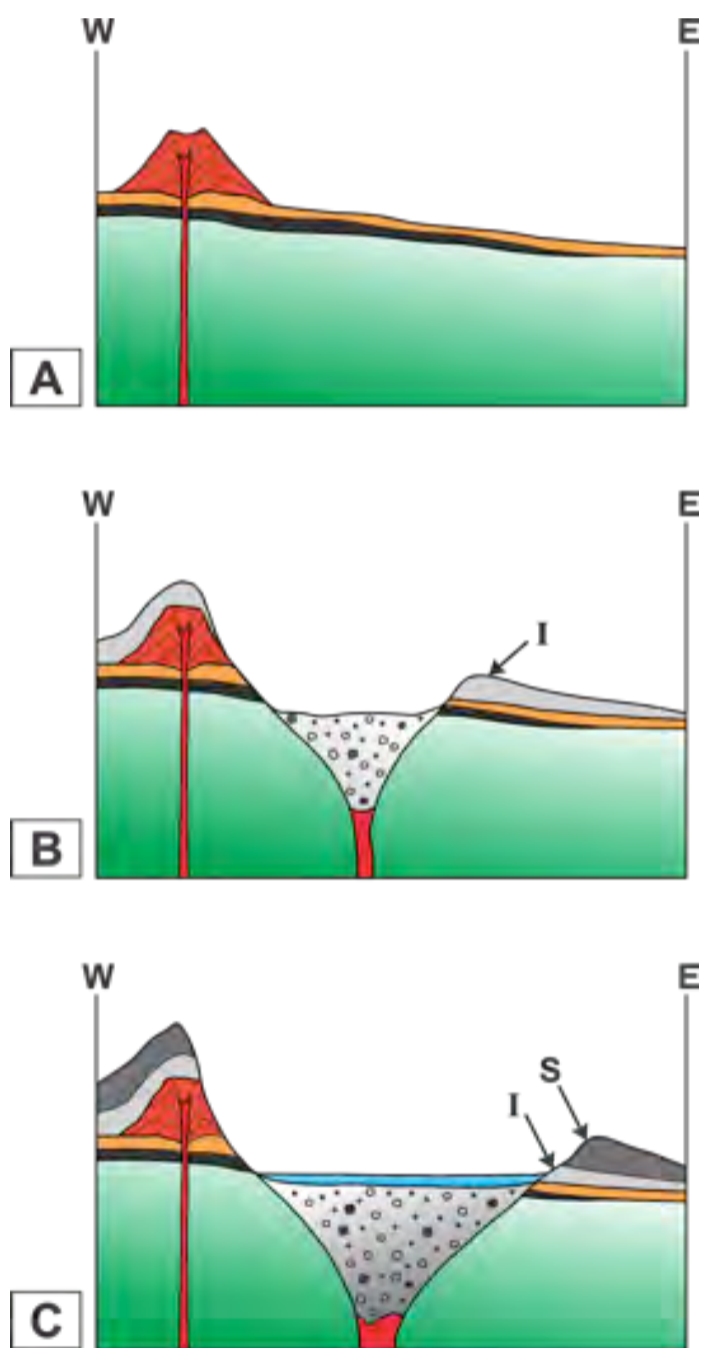


Figura 2.9. Modelo evolutivo sobre la formación del cráter Alchichica (modificado de Chako-Tchambe *et al.* en revisión). A) Construcción de un cono de escorias sobre una secuencia de rocas preexistentes (pre-axalapazco). B) Formación de la secuencia inferior del axialapazco a partir de erupciones freatomagmáticas relativamente “secas”. C) Ampliación del cráter y formación de la secuencia superior con erupciones freatomagmáticas más húmedas. (Figura: Gerardo Carrasco-Núñez).

Agradecimientos

Este trabajo fue patrocinado por los proyectos PAPIIT 106314 y CONACYT-15090. Algunas figuras fueron diseñadas por Javier Hernández. Un agradecimiento especial a Javier Alcocer por la invitación a participar en este volumen.

Referencias

- Carrasco-Núñez, G. & N. R. Riggs. 2008. Polygenetic nature of a rhyolitic dome and implications for hazard assessment: Cerro Pizarro volcano, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 171: 307-315.
- Carrasco-Núñez, G., P. Dávila-Harris, N. R. Riggs, M.H. Ort, B.W. Zimmer, C.P. Willcox & M.J. Branney. 2012. Recent explosive volcanism at the Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. En Aranda-Gómez, J.J., G. Tolson & R.S. Molina-Garza (Eds.). *The Southern Cordillera and Beyond: Geological Society of America Field Guide* 25: 83-113.
- Carrasco-Núñez, G., M. H. Ort, N. R. Riggs, B. W. Zimmer, A., L. De León & M. López. 2014. Contrasting eruptive styles of late Pleistocene-to-Holocene monogenetic volcanism from *maars* to domes in the Serdán-Oriental basin, eastern Mexican Volcanic Belt. *Post-meeting field guide for the 5th International Maar Conference*, Querétaro, México, 36 pp.
- Chako-Tchambe, B., G. Carrasco-Núñez, D.P. Miggins & M. López. Late Pleistocene Strombolian-to-phreatomagmatic activity of Alchichica *maar* volcano, Serdán-Oriental basin, Eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Bulletin of Volcanology*, en revisión.
- Ferrari, F., M. López-Martínez, G. Aguirre-Díaz & G. Carrasco-Núñez. 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology* 27: 303-306.

- Ferriz, H. & G. Mahood. 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *Journal of Geophysical Research* 89: 8511-8524.
- Filonov, A., I. Tereshchenko & J. Alcocer. 2006. Dynamic response to mountain breeze circulation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33. L07404.
- Gasca-Durán, A. 1980. Génesis de los lagos cráter de la cuenca de Oriental. *Colección Científica Prehistoria* 98: 57.
- Negendank, J., R. Emmerman, R. Krawczyk, F. Mooser, H. Tobschall & D. Werle. 1985. Geological and geochemical investigations on the Eastern TMV. *Geofísica Internacional* 24: 277-575.
- Ordóñez, E. 1906. Los xalapazcos del estado de Puebla. Instituto de Geología, México 1: 348-405.
- Reyes, M. 1979. Geología de la Cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. *Colección científica Prehistoria* 71: 62.
- Viniegra. 1965. Geología del Macizo de Teziutlán y la cuenca Cenozoica de Veracruz. *Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros* 17:101-165.
- Wohletz K. H. & G. Heiken. 1992. Volcanology and Geothermal Energy. Berkeley, University of California, 432 pp.
- Yañez, C., & S. García-Durán. 1982. Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, estados de Puebla y Veracruz. C.F.E.: 98 pp.

Contacto

Gerardo Carrasco-Núñez. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Geociencias, Campus Juriquilla, C.P. 76230, Querétaro, México.
gerardoc@geociencias.unam.mx





El clima en la región

Margarita Caballero

Raúl A. Silva-Aguilera

Óscar Escolero

Controles generales del clima en México

El clima en el territorio mexicano se define por la influencia que tienen los elementos de la circulación atmosférica global de acuerdo con la latitud del país, en particular los vientos Alisios y la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) durante el verano (Fig. 3.1) y las Celdas de Alta Presión Subtropicales durante el invierno (Mosiño-Alemán y García 1974). Durante el verano, la migración estacional de la ZCIT la lleva a ubicarse en su posición más septentrional (desplazada hacia el norte) y asociado con esto, la mayor parte de México queda bajo la influencia de los vientos Alisios, que fluyen de este a oeste y que transportan humedad desde el Mar Caribe y Golfo de México hacia el continente (Mosiño-Alemán y García 1974). En las últimas décadas se ha identificado que dentro del flujo de los vientos Alisios hay una corriente de chorro de bajo nivel (vientos que se mueven a altas velocidades) cuya trayectoria pasa sobre el Mar Caribe y que juega un papel importante en el transporte de humedad hacia la región de Centroamérica, México e incluso hasta el sur de los Estados Unidos (Wang 2007, Whyte *et al.* 2008, Cook y Vizy 2010). Durante el verano esta corrien-

te se divide en dos ramales, uno de ellos se dirige hacia el noroeste y transporta humedad desde el Mar Caribe al Golfo de México y de allí hasta el interior del continente (Muñoz *et al.* 2008, Cook y Vizy 2010). La rama sureña se dirige al oeste y lleva humedad hacia Centroamérica. Dentro del flujo de los vientos Alisios también se presentan zonas de baja presión atmosférica conocidas como Ondas del Este, que fluyen con los vientos Alisios para cruzar el Atlántico. Al llegar a las aguas cálidas del Caribe, estas ondas de baja presión favorecen la formación de tormentas tropicales que frecuentemente llegan a desarrollarse como huracanes. En la cuenca del Pacífico también se generan aguas cálidas sobre las que se pueden formar tormentas tropicales y huracanes.

En ambas vertientes, Atlántica y Pacífica, los huracanes transportan un porcentaje importante de la humedad y de la precipitación que llega al continente americano, sobre todo hacia finales del verano e inicios de otoño (máximo en septiembre). Por otro lado, la elevada insolación asociada al verano origina zonas de baja presión en el Norte de México y sur de los Estados Unidos, lo que favorece el flujo de vientos y transporte de humedad tanto del Golfo de México como del Pacífico y

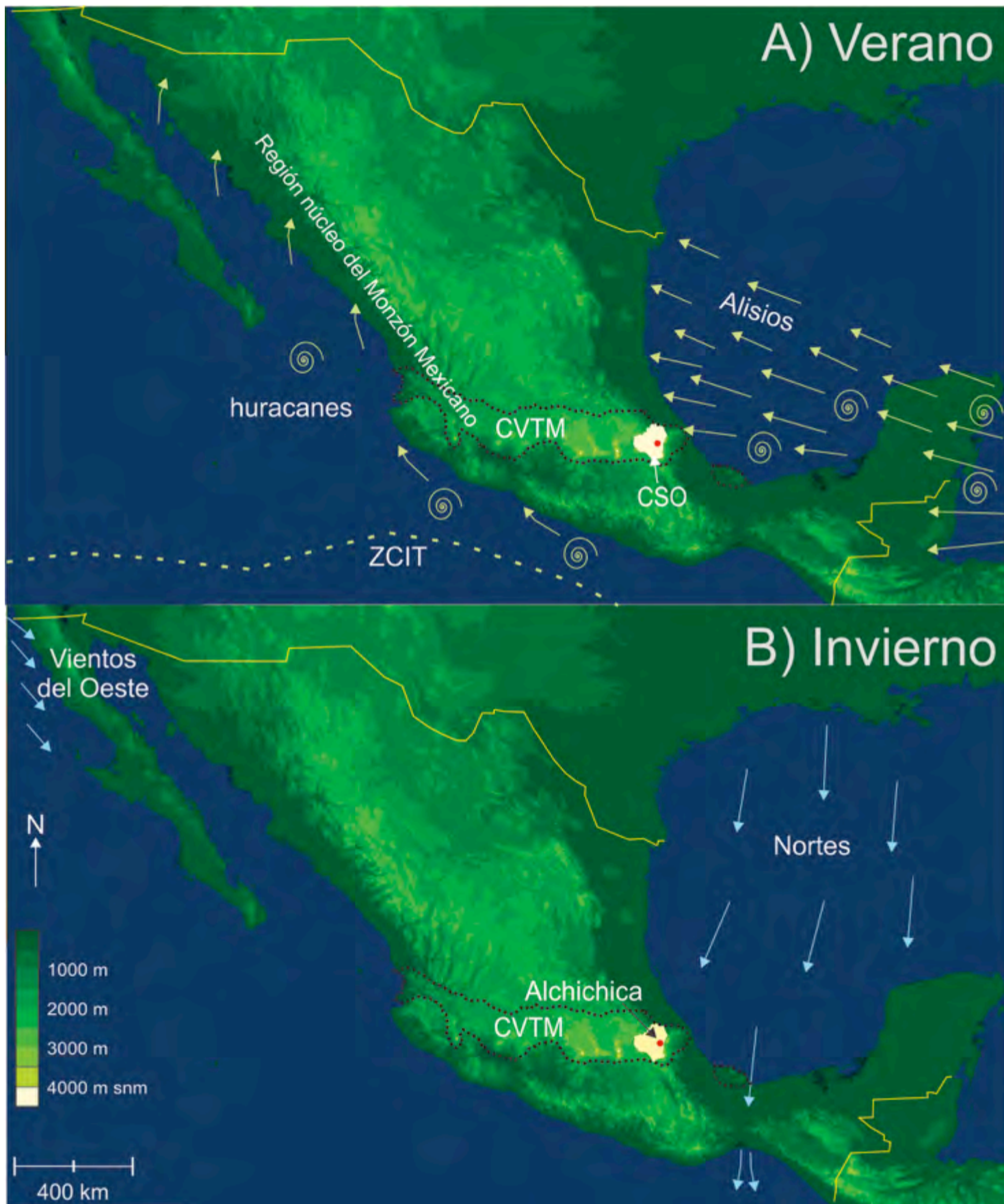


Figura 3.1. Mapas que muestran de forma esquemática los elementos de la circulación atmosférica global que transportan humedad y generan precipitación pluvial en México durante verano (A) e invierno (B). (CVTM = Cinturón Volcánico Trans-mexicano, CSO = Cuenca Serdán-Oriental, ZCIT = Zona de Convergencia Intertropical).

Mar de Cortés hacia esta región, en un tipo de circulación que se conoce como Monzón Mexicano (Douglas *et al.* 1993).

Durante el invierno el panorama cambia, la ZCIT se desplaza hacia el sur y, por ende, la mayor parte de México queda bajo la influencia de las celdas de alta presión subtropicales (regiones de alta presión atmosférica y muy bajos niveles de precipitación que se ubican en latitudes subtropicales, entre los 23 y 30°N). Esto favorece el establecimiento de una estación de secas sobre la mayor parte del territorio nacional. Sólo en la zona norte de Baja California, que por su mayor latitud está expuesta a la influencia de los vientos del oeste, se presenta una modesta estación de lluvias en invierno. Durante esta estación también se puede presentar la entrada de viento frío del norte a territorio mexicano y que, al chocar con masas de aire más cálidas, forman frentes fríos conocidos como Nortes, que pueden generar lluvias invernales y descensos importantes en la temperatura.

Como se muestra, las estaciones a lo largo del año en México se marcan de forma muy diferente a lo que ocurre en las zonas templadas, en donde las estaciones se definen principalmente por la temperatura, con una estación fría (invierno), que normalmente también es de lluvias o nevadas y una cálida (verano) que frecuentemente es seca. En México, y en general en las latitudes tropicales, la estacionalidad anual está más bien definida por la precipitación, con una estación de lluvias (verano-otoño) y otra de secas (invierno-pri-

mavera). Es interesante resaltar también que, a diferencia de los climas templados donde las mayores temperaturas se presentan en verano, en los climas tropicales, y por ende en gran parte del territorio mexicano, la estación en donde se presentan las mayores temperaturas es la primavera. De esta manera en nuestro país se puede distinguir además de la estación de lluvias de verano-otoño, una etapa seca y relativamente fría durante el invierno y una etapa seca, muy caliente y con un máximo de evaporación durante la primavera.

Factores locales que modifican el clima en la cuenca Serdán-Oriental

Además de los factores antes mencionados, la intrincada topografía de México también incide de forma importante en sus climas, los modifica localmente al favorecer temperaturas más bajas conforme aumenta la altitud. Esto es importante para las cuencas de altura del Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (CVTM), la cadena de volcanes que atraviesa el centro de México desde el océano Pacífico hasta el Golfo de México.

Entre estas cuencas de altura se encuentra la de Serdán-Oriental, en donde se ubica el lago Alchichica, con altitudes superiores a los 2,300 m s.n.m. Además, la cuenca Serdán-Oriental se ubica en la intersección del CVTM con la Sierra Madre Oriental (SMO) lo cual tiene repercusiones importantes en su clima, ya que la SMO bloquea el flujo de humedad que acarrear

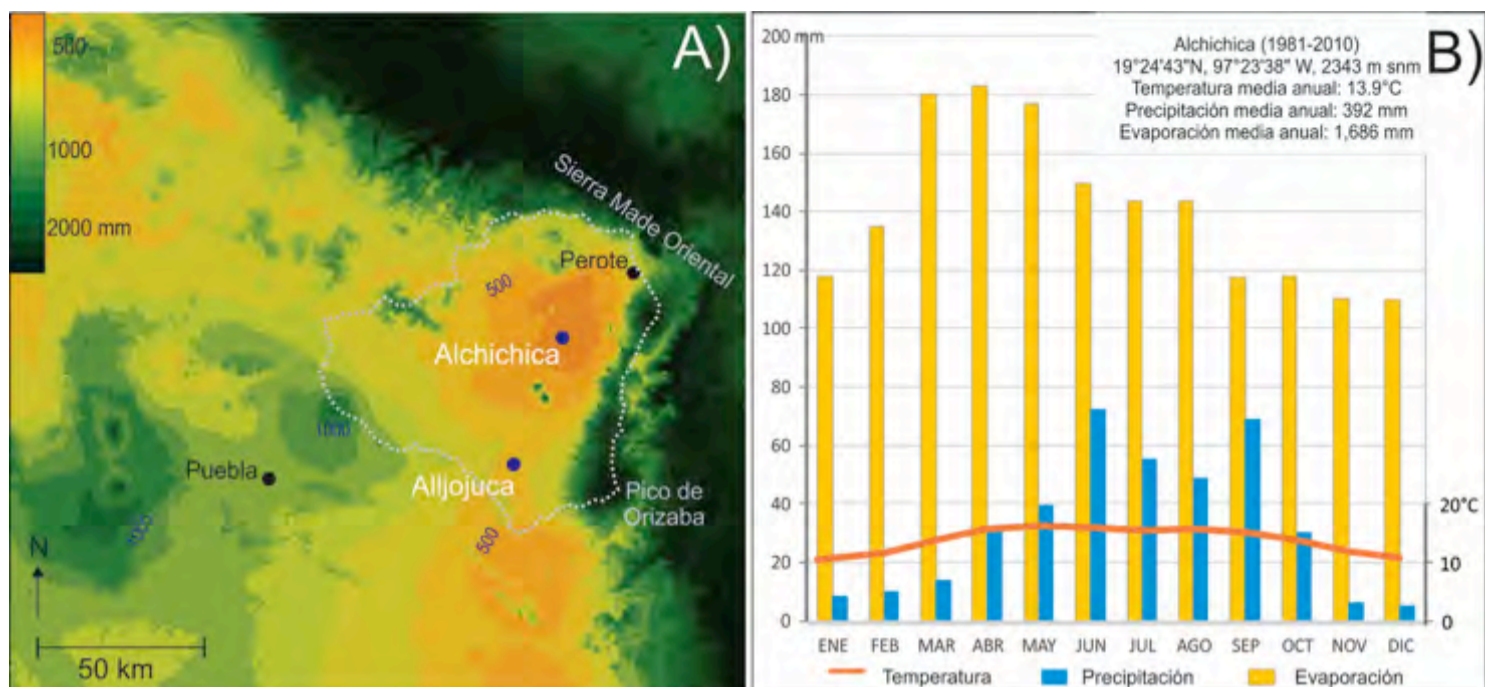


Figura 3.2. A) Mapa con la distribución de la precipitación media anual en la cuenca Serdán-Oriental, Puebla (construido con datos de Fick y Hijmans, 2017). B) Climograma de Alchichica, Puebla, México. [Datos de la estación 21052-Alchichica, Normales Climatológicas (1981-2010), Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018)].

los vientos Alisios desde el Golfo de México, para generar lo que se conoce como “sombra de montaña”. De esta manera, la vertiente este de la SMO (hacia el Golfo de México) presenta climas húmedos con precipitaciones medias anuales de más de 1,500 mm, mientras que la vertiente oeste (al interior del continente) y en donde se ubica la cuenca Serdán-Oriental, experimenta condiciones mucho más secas, con precipitaciones medias anuales menores a 600 mm (Fig. 3.2).

Los tipos climáticos dentro de la cuenca Serdán-Oriental varían en distancias muy cortas (menos de 10 km) desde climas templados secos a semisecos en su zona oriental, al pie de la SMO, con una precipitación anual menor a 500 mm (Figs. 3.2 y 3.3), a climas templados subhúmedos en la zona occidental, más distante del efecto de sombra de montaña de la SMO, con niveles de precipitación anual entre

500 y 800 mm. En las partes más altas de la cuenca, como en el Cofre de Perote y el Pico de Orizaba, se presentan climas gradualmente más frescos y húmedos (precipitación media anual > 800 mm), llegan a presentar climas fríos y muy fríos en sus cimas. Alchichica se ubica justo dentro de la zona de climas más secos, con una precipitación anual de 400 mm (Figs. 3.2 y 3.3) y una evaporación anual muy elevada con 1,700 mm (Fig. 3.2 B).

La distribución de las lluvias está concentrada entre mayo y octubre, con máximos en junio y septiembre (SMN 2018). Este patrón de precipitación máxima bimodal, con una disminución relativa en julio y agosto, se conoce como “canícula” y es típica de los climas de la vertiente del Golfo de México.

La temperatura media anual es de 14°C, con un máximo de temperatura en mayo (media mensual de 16.3°C) y un mínimo en

enero (media mensual de 10.4°C). La evaporación presenta sus valores máximos en los meses de marzo a mayo, durante la temporada de secas.

Tendencias climáticas recientes en el lago Alchichica

El análisis de los datos meteorológicos recabados entre los años 1966 y 2016 en la estación climatológica Alchichica 21052 del Servicio Meteorológico Nacional (SMN 2018), ubicada en la orilla del lago, permiten analizar cuáles han sido las tendencias y cambios en las variables meteorológicas durante los últimos 50 años. De manera global la temperatura promedio diaria entre 1966 y 2016 presentó una tendencia de aumento de 0.23°C por década (Fig. 3.4 A). Para el mismo intervalo temporal, la evaporación diaria tuvo una ligera tendencia global de disminución de 0.14 mm por década (Fig. 3.4 B), mientras que la precipitación tiene datos con una gran variabilidad interanual y no presenta una tendencia estadísticamente significativa a lo largo de los 50 años que abarca la serie de datos (Fig. 3.4 C).

Sin embargo, los datos presentan tendencias temporales más complejas cuando se analizan sus variaciones anuales (Fig. 3.4 A-C). En los datos de temperatura se observan valores por debajo del promedio entre 1966 y 1985, a partir de esta fecha los valores tienden a ser superiores al promedio; la serie muestra por lo tanto una tendencia de

aumento en la temperatura y presenta sus valores máximos entre 1994-1998 (Fig. 3.4 A), pero con una tendencia posterior hacia el descenso. Los valores de evaporación son en general superiores al promedio antes de 1998 y presentan una tendencia a la disminución, con valores por debajo del promedio después de este año (Fig. 3.4 B). Esta tendencia a la disminución de la evaporación después de 1998 está en sincronía con la misma tendencia encontrada en la temperatura, si bien en fechas anteriores ambas variables se comportan de manera opuesta. En la precipitación, a pesar de la gran dispersión de los datos, se puede identificar que el periodo entre 1987 y 1999 tuvo condiciones más secas (Silva-Aguilera 2019), con precipitación que es en general menor al promedio (Fig. 3.4 C) y que coincide con los valores más elevados de temperatura y evaporación.

Tendencias climáticas durante la edad Megalayana del Holoceno (últimos 4,200 años) en la cuenca Serdán-Oriental

Estudios paleoambientales basados en análisis geoquímicos, de polen y partículas de carbón realizados en una secuencia sedimentaria proveniente del lago Aljojuca, al SO de Alchichica (Fig. 3.2 A), aportan evidencias sobre la evolución del clima en la cuenca Serdán-Oriental durante los últimos 4,200 años (Bhattacharya *et al.* 2015, Bhat-

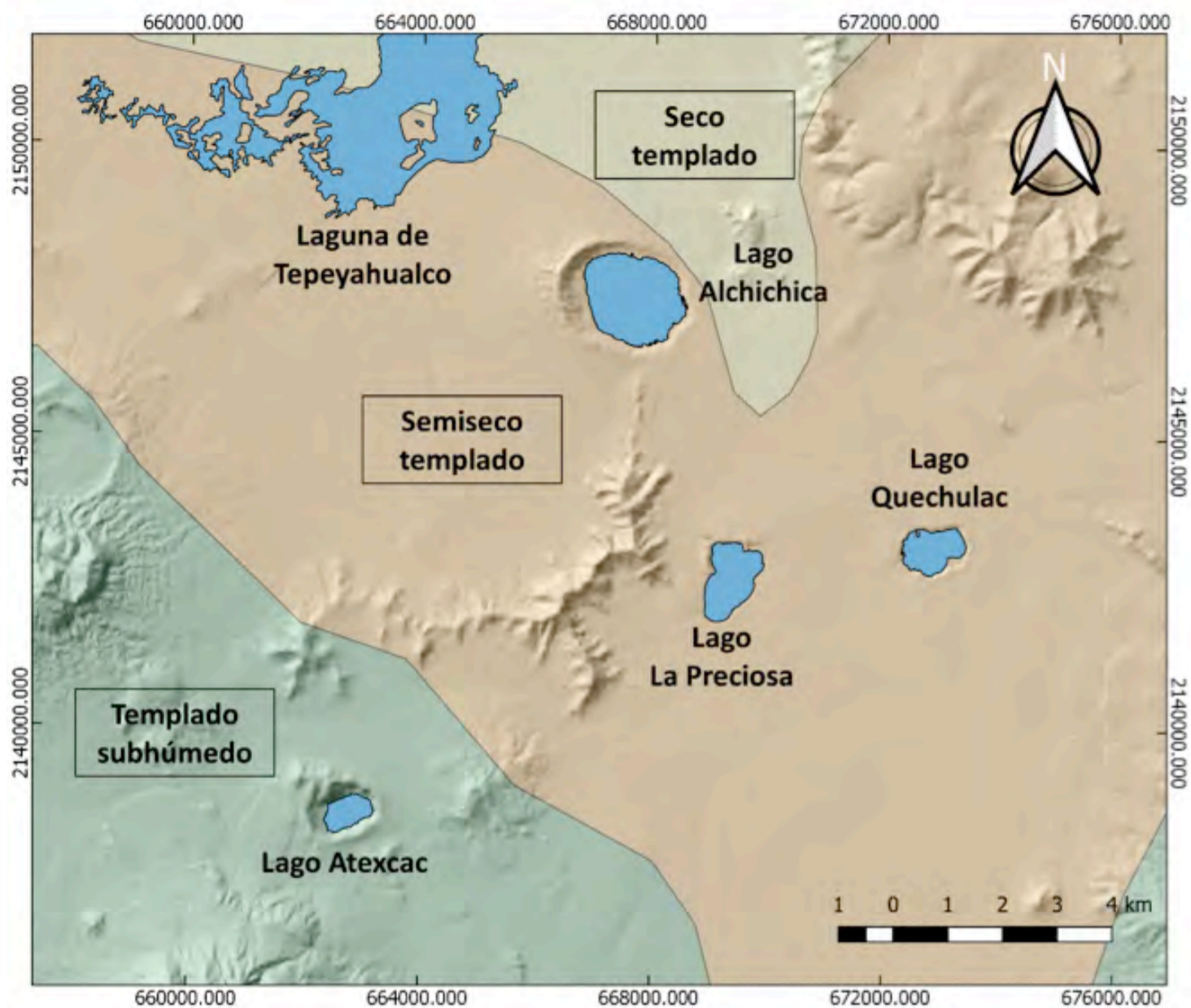


Figura 3.3. Mapa que muestra los diferentes climas existentes en los alrededores del lago Alchichica, al este de la Cuenca Serdán-Oriental, Puebla. (Construido a partir de datos de la CONABIO 1998).

tacharya y Byrne 2016.). Los resultados de estos análisis se correlacionan bien con las tendencias climáticas regionales documentadas para el centro de México por diversos estudios paleoambientales realizados en otras cuencas a lo largo del CVTM (Lozano-García *et al.* 2007, Metcalfe *et al.* 2007, Metcalfe *et al.* 2010, Cuna *et al.* 2014, Rodríguez-Ramírez *et al.* 2015, Vázquez *et al.* 2017), así como en la región de Yucatán (Hodell *et al.* 2005a, Hodell *et al.* 2005b).

En términos generales, los estudios antes mencionados sugieren la presencia de

climas comparativamente más húmedos hace aproximadamente 3,000 a 2,000 años (año 1,000 a 1 a. C.); sin embargo, alrededor del año 600 d. C. (hace \approx 1,500 años), el clima local y regional cambió. El registro del lago Aljojuca (Bhattacharya *et al.* 2015, Bhattacharya y Byrne 2016) es consistente con las señales paleoambientales de otros sitios en el CVTM que identifican un periodo de sequía entre los años 600 a 1100 d. C.

Esto es evidente en Aljojuca, entre otros indicadores, por el registro del elemento titanio (Fig. 3.5), el cual es transportado por la

escorrentía de la cuenca hacia el lago, por lo que valores bajos de este elemento denotan etapas más secas.

Este evento climático es el más intenso de los últimos 4,200 años y puede ser identificado en casi todos los registros paleoambientales del CVTM, desde su extremo occidental (lago Santa María del Oro, Nayarit, Rodríguez-Ramírez *et al.* 2015) hasta su extremo oriental (lago Verde, Los Tuxtlas, Veracruz, Lozano *et al.* 2007). Esta tendencia climática también se ha identificado en los registros de la zona Maya, en Yucatán (lago Chichancanab, Yucatán, Hodell *et al.* 2005a), en donde se ha relacionado con el abandono de las ciudades Mayas a finales del periodo cultural Clásico, entre 600 a 900 d. C. En realidad, este evento de sequía de finales del Clásico parece haber tenido particular relevancia en el devenir de las

culturas Mesoamericanas, ya que durante este tiempo se registra el abandono de muchas de las grandes ciudades, no solo en la zona Maya, sino en toda Mesoamérica. En la cuenca Serdán-Oriental en particular, la sequía de finales del Clásico corresponde con el colapso de la ciudad de Cantona ocurrido entre los años 900 a 1050 d. C. (Bhattacharya *et al.* 2015). Estas condiciones climáticas muy probablemente también afectaron la evolución de los lagos en la zona y favorecieron incrementos en su salinidad al concentrarse por evaporación.

Después de la intensa sequía del final del Clásico, el clima de la cuenca Serdán-Oriental, así como el del centro de México, en general, registra un intervalo relativamente húmedo entre los años 1100 y 1450 d. C., cuando una nueva tendencia hacia climas más secos se presenta en diversos

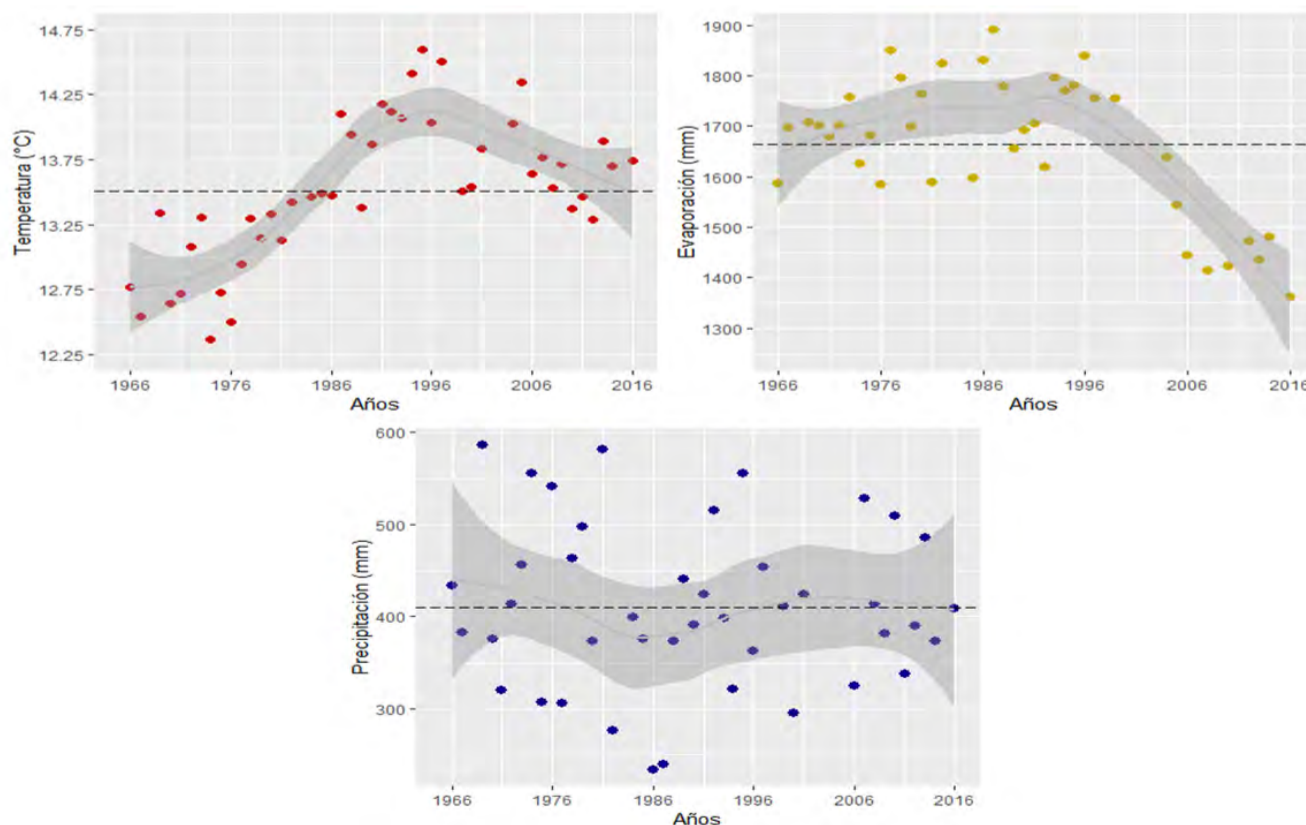


Figura 3.4. Gráficas de las variables meteorológicas: A) temperatura promedio anual, B) evaporación anual y C) precipitación con respecto al tiempo. Las rectas punteadas horizontales representan los valores medios y las curvas grises representan la variación de las tendencias de los datos (Silva-Aguilera 2019).

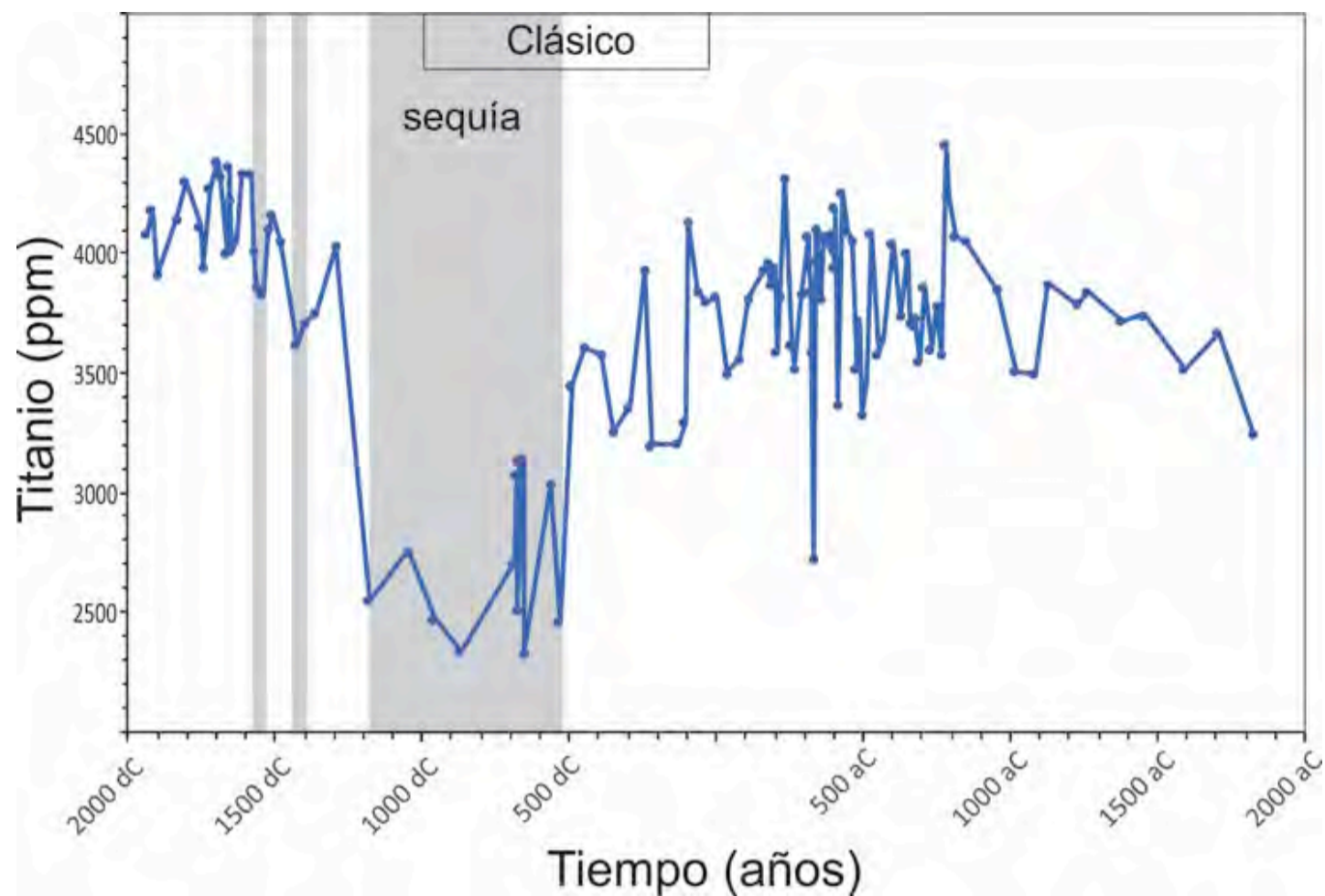


Figura 3.5. Registro del elemento titanio en los sedimentos del lago Aljojuca, Puebla (Bhattacharya y Byrne, 2016). (Valores bajos en este elemento denotan etapas de sequía).

registros del centro del país (Metcalf *et al.* 2010, Cuna *et al.* 2014, Rodríguez-Ramírez *et al.* 2015). Esta sequía es de menor intensidad que la de finales de Clásico y se asocia con climas relativamente fríos durante la llamada Pequeña Edad de Hielo (PEH). La PEH en diversos registros del centro de México presenta dos pulsos que se han asociado con etapas de disminución en la actividad solar, conocidos como los mínimos solares de Spörer (1450 a 1550) y de Maunder (1650-1750) (Lozano-García *et al.* 2007, Cuna *et al.* 2014, 2015). Sin embargo, en el registro del lago Aljojuca la señal ambiental durante la PEH es difícil de interpretar, ya que el impacto humano asociado con la llegada de los españoles a la región después

del año 1521 marca cambios ecológicos importantes que son difíciles de entender en términos climáticos (Bhattacharya y Byrne 2016). El término de la PEH a finales del siglo XIX y principios del XX (Lozano-García *et al.* 2007, Cuna *et al.* 2014, Rodríguez-Ramírez *et al.* 2015) marca el establecimiento de climas similares a los modernos.

Conclusiones

El clima en la cuenca Serdán-Oriental ha variado en los últimos miles de años en sincronía con los cambios observados en el clima regional del centro de México; destaca particularmente una intensa sequía regis-

trada entre los años 600 a 1100 d. C. que coincide con el final del periodo Clásico y el abandono de muchas ciudades Mesoamericanas, entre ellas Cantona. Actualmente, el clima dentro de la cuenca es heterogéneo debido a la interacción entre la circulación atmosférica y la topografía. Dentro de la cuenca, en general existen dos grandes zonas: la oriental —donde se encuentra Alchichica—, influenciada por la sombra de montaña generada por la SMO con climas más secos y la occidental con climas templados subhúmedos. En los últimos 50 años la zona de Alchichica ha experimentado una tendencia general de aumento en la temperatura, una ligera disminución en la evaporación y precipitación muy variable sin una tendencia definida. Sin embargo, durante el periodo de 1987 a 1999 prevalecieron condiciones relativamente más secas (menor precipitación, más temperatura y evaporación).

El clima es muy importante para el lago Alchichica ya que tiene una influencia directa en su balance hídrico (es decir, en las entradas y salidas de agua) y por lo tanto en su nivel (ver capítulo *El agua subterránea y el lago*). Asimismo, la dinámica en la estructura térmica del lago (ver capítulo *El cuerpo de agua*) está determinada por las variaciones anuales en la temperatura. En conjunto, estos factores intervienen en la dinámica ecológica interna del lago, por lo que el entendimiento del clima no sólo presente, sino pasado y también futuro es indispensable en el estudio del lago Alchichica.

Agradecimientos

RASA agradece al CONACyT por la beca 620579 para estudios de maestría y por la beca de movilidad.

Referencias

- Bhattacharya, T. & R. Byrne. 2016. Late Holocene anthropogenic and climatic influences on the regional vegetation of Mexico's Cuenca Oriental. *Global and Planetary Change* 138: 56-69.
- Bhattacharya, T., R. Byrne, H. Böhnelt, K. Wogau, U. Kienel, L. Ingram & S. Zimmerman. 2015. Cultural implications of late Holocene climate change in the Cuenca Oriental, Mexico. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 1693-1698.
- CONABIO. 1998. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO)-Geoportal Climas (http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/clima/climas/clima1mgw).
- Cook, K. H. & E. K. Vizy. 2010. Hydrodynamics of the Caribbean low-level jet and its relationship to precipitation. *Journal of Climate* 23: 1477-1494.
- Cuna, E., M. Caballero, E. Zawisza & A. C. Ruiz-Fernández. 2015. Historia ambiental de un lago alpino en el centro de México (1230 - 2010). *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas* 18: 106-115.
- Cuna, E., E. Zawisza, M. Caballero, A. C. Ruiz-Fernández, M. S. Lozano-García & J. Alcocer. 2014. Environmental impacts of Little ice Age cooling in central Mexico recorded in the sediments of a tropical alpine lake. *Journal of Paleolimnology* 51: 1-14.
- Douglas, M. W., R. A. Maddox, K. Howard & S. Reyes. 1993. The Mexican monsoon. *Journal of Climate* 6: 1665-1677.

- Fick, S. E. & R. J. Hijmans. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37: 4302-4315.
- Hodell, D. A., M. Brenner & J. H. Curtis. 2005a. Terminal Classic drought in the northern Maya lowlands inferred from multiple sediment cores in Lake Chichancanab (Mexico). *Quaternary Science Reviews* 24: 1413-1427.
- Hodell, D. A., M. Brenner, J. H. Curtis, R. Medina-González, E. Ildfonso Chan Can, A. Albornaz-Pat & T. P. Guilderson. 2005b. Climate change on the Yucatán Peninsula during the Little Ice Age. *Quaternary Research* 63: 109-121.
- Lozano-García, M. S., M. Caballero, B. Ortega, A. Rodríguez & S. Sosa. 2007. Tracing the effects of the Little Ice Age in the tropical lowlands of Eastern Mesoamerica. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 104: 16200-16203.
- Metcalf, S. E., S. J. Davies, J. D. Braisby, M. J. Leng, A. J. Newton, N. L. Terrett & S. L. O'Hara. 2007. Long and short-term change in the Patzcuaro Basin, central Mexico. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology* 247: 272-295.
- Metcalf, S. E., M. D. Jones, S. J. Davies, A. Noren & A. MacKenzie. 2010. Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlán, Mexico. *The Holocene* 28: 1195-1206.
- Mosiño-Alemán, P. A. & E. García. 1974. The climate of Mexico. En: Bryson, R. A. H. & F. K. Hare (Eds.), *Climates of North America* Elsevier, New York, pp. 345-405.
- Muñoz, E., A. J. Busalacchi, S. Nigam & A. Ruiz-Barradas. 2008. Winter and summer structure of the Caribbean low-level jet. *Journal of Climate* 21: 1260-1276.
- Rodríguez-Ramírez, A., M. Caballero, P. Roy, B. Ortega, G. Vázquez-Castro & S. Lozano-García. 2015. Climatic variability and human impact during the last 2000 years in western Mesoamerica: evidence of late Classic (AD 600-900) and Little Ice Age drought events. *Climate of the Past* 11: 1239.
- Silva-Aguilera, R. 2019. Análisis del descenso del nivel del agua en el lago de Alchichica, Puebla., Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, p. 115.
- SMN. 2018. Servicio Meteorológico Nacional (SMN), Normales Climatológicas (online) disponible en: <http://smn.cna.gob.mx/emas/> (descarga mayo, 2018).
- Vázquez, G., P. D. Roy, B. Solis, E. Blanco & R. Lozano-Santacruz. 2017. Holocene paleohydrology of the Etzatlán-Magdalena basin in western-central Mexico and evaluation of main atmospheric forcings. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 487: 149-157.
- Wang, C. 2007. Variability of the Caribbean low-level jet and its relations to climate. *Climate Dynamics* 29: 411-422.
- Whyte, F. S., M. A. Taylor, T. S. Stephenson & J. D. Campbell. 2008. Features of the Caribbean low level jet. *International Journal of Climatology* 28: 119-128.

Contacto

Margarita Caballero. Laboratorio de Paleolimnología, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.
maga@igeofisica.unam.mx

Raúl A. Silva-Aguilera. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Óscar Escolero. Departamento de Dinámica Terrestre Superficial, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Ciudad Universitaria, Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, México.





El agua subterránea y el lago

Raúl A. Silva-Aguilera

Óscar Escolero

Introducción

De todos los componentes del ciclo hidrológico, el agua subterránea es uno en los que comúnmente se piensa menos. La razón más probable es que es el menos visible ya que está bajo tierra. Sin embargo, es tanto o regionalmente más importante que el resto de los componentes. Tan es así que enseguida se expone el papel protagónico que juega el agua subterránea en la presencia y persistencia del lago Alchichica. El agua subterránea se define como aquella que circula entre los espacios vacíos del subsuelo. Comúnmente, el concepto de agua subterránea se acota a la porción que fluye en la llamada *zona saturada* que es la porción del subsuelo en la que los espacios se encuentran saturados o llenos de agua. La delimitación entre la zona saturada y la *zona no saturada* (la porción del subsuelo que presenta parte de los espacios con aire y parte llenos de agua) se conoce como *nivel freático*. A los estratos del subsuelo que transmiten agua se les ha denominado tradicionalmente *acuíferos*.

En el ciclo hidrológico, la precipitación pluvial es parcialmente interceptada por la vegetación, otra parte escurre por la superficie formando arroyos y ríos, otra más se

evapora y el resto se infiltra en el subsuelo. El agua que se infiltra también puede provenir de escurrimientos y de otros cuerpos de agua superficiales (por ejemplo, ríos, arroyos, lagos y humedales). A estos mecanismos se puede añadir uno de carácter artificial, que es el agua excedente de ciertos usos del ser humano como lo es el riego agrícola. Una vez infiltrada, una porción del agua queda retenida en el suelo y puede ser aprovechada por la vegetación o evaporarse; el resto se infiltra hacia la zona saturada, fenómeno conocido como percolación y que eventualmente constituye la recarga del acuífero.

El agua subterránea se desplaza por los estratos del subsuelo a velocidades variables que van de unos pocos decímetros hasta algunos cientos de metros al año (Escolero 2018). Recientemente, se ha propuesto el concepto de *sistema regional de flujo de agua subterránea*. Bajo esta denominación se sabe que hay una conectividad hidrológica entre las distintas zonas de una cuenca en la cual es evidente la interconexión que existe entre el agua subterránea y los cuerpos de agua superficiales (por ejemplo, lagos y ríos).

A medida que el agua subterránea fluye puede descargar ya sea en puntos

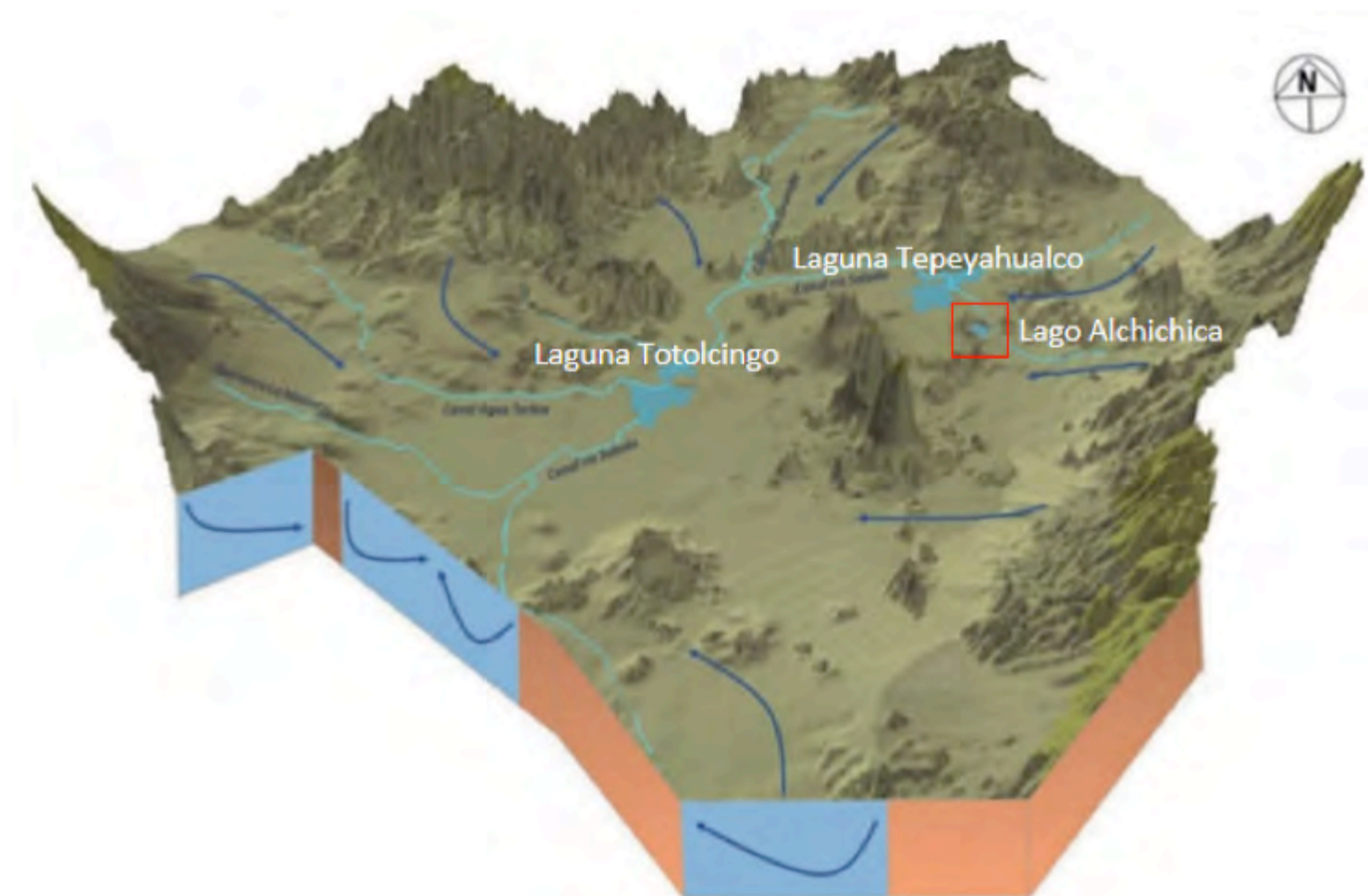


Figura 4.1. Representación en 3D del sistema de flujo de agua subterránea del Sistema Tepeyahualco elaborada con base en las redes de flujo de CONAGUA, IMTA y UNAM. En el cuadro rojo se denota la ubicación del lago Alchichica. (Figura tomada de Escolero 2018).

intermedios de su camino, conocidos como *niveles base de descarga local* (como lo son manantiales, cauces fluviales, lagos, ríos y humedales) o bien en los puntos terminales de su recorrido, conocidos como *niveles base de descarga global*, que normalmente se ubican en las zonas costeras.

La excepción a lo anterior son las *cuencas endorreicas* como en la que se encuentra el lago Alchichica, que son sistemas de drenaje interno que se caracterizan por el hecho de que no hay flujo de salida hacia el mar (ni hacia otras cuencas), ya sea por flujo superficial y en principio tampoco por flujo subterráneo. En estas cuencas los *niveles base de descarga global*

se encuentran en las porciones más bajas de la cuenca y son lagos o planicies de inundación, que dan lugar a humedales, de los cuales el agua sale únicamente por medio de la evapotranspiración (Escolero 2018).

El ser humano extrae agua de manera artificial por medio de pozos, galerías (técnica milenaria originada en el cercano oriente para llevar a la superficie aguas subterráneas por gravedad) y otros tipos de captaciones para su aprovechamiento, interceptando y alterando el recorrido natural del sistema de flujo subterráneo.

El agua subterránea interactúa con los materiales del subsuelo a través de los cuales circula y disuelve distintos elementos

químicos de éstos. En general, entre más tiempo permanece el agua en el sistema de flujo subterráneo, tendrá más elementos disueltos y en mayor concentración.

Sistema de flujo Tepeyahualco

El lago Alchichica se encuentra dentro del sistema regional de flujo de agua subterránea (SIRAS) número 26, denominado Sistema Tepeyahualco (Escolero 2018); este tiene una extensión de 4,830 km² (Fig. 4.1). En la zona del Sistema Tepeyahualco predominan los materiales volcánicos (cuyo origen y detalles particulares son explicados en el capítulo *Origen y formación del cráter*). En general, la zona está dominada por depósitos piroclásticos (y en menor medida por derrames lávicos), que desde el punto de vista hidrogeológico son materiales con porosidades y conductividades hidráulicas altas.

El clima predominante en la parte central de la cuenca es de árido a semiárido con una precipitación promedio de < 500 mm año⁻¹ y evapotranspiración de 1,690 mm año⁻¹ (Alcocer *et al.* 2004, Adame *et al.* 2008) lo cual sugiere un balance hídrico negativo. Estas características geológicas y climáticas causan que del agua que precipita una porción se evapore y otra se infiltre rápidamente sin dar lugar al establecimiento de corrientes superficiales permanentes, esto es, no hay ríos ni arroyos perennes, lo cual en conjunto le confiere el carácter de *cuenca endorreica*.

El flujo subterráneo del Sistema Tepeyahualco se mueve desde las principales montañas que bordean la cuenca (los volcanes Cofre de Perote y Citlaltépetl, mejor conocido como Pico de Orizaba del lado este y el volcán La Malinche al oeste). Reyes (1979) reportó la existencia de manantiales (descargas superficiales del sistema de flujo) en la parte basal de las montañas más altas y en la planicie, siendo los más importantes Vicencio, Ojo de Agua, Lara Grajales y El Carmen. No obstante, este mismo autor menciona que la mayoría de los manantiales se han secado, han disminuido su caudal o han sido desviados para irrigación (Alcocer *et al.* 1998).

Los niveles base de descarga global del sistema son las lagunas de Totolcingo y Tepeyahualco, otrora extensos cuerpos de agua perennes que cubrían una amplia área central de la cuenca y, que hoy en día se encuentran muy reducidas y constituyen más bien humedales intermitentes que se forman durante la temporada de lluvias. Sin embargo, no se puede descartar que existan componentes más profundos del sistema de flujo de agua subterránea que continúen su camino hacia otras cuencas tal y como lo menciona Cruickshank (1992), mientras indica que existen salidas en el norte de la cuenca Oriental hacia cuencas más bajas a través del puerto ubicado entre el Cofre de Perote y la Caldera de Los Humeros.

Interacción, lago Alchichica–sistema de flujo subterráneo

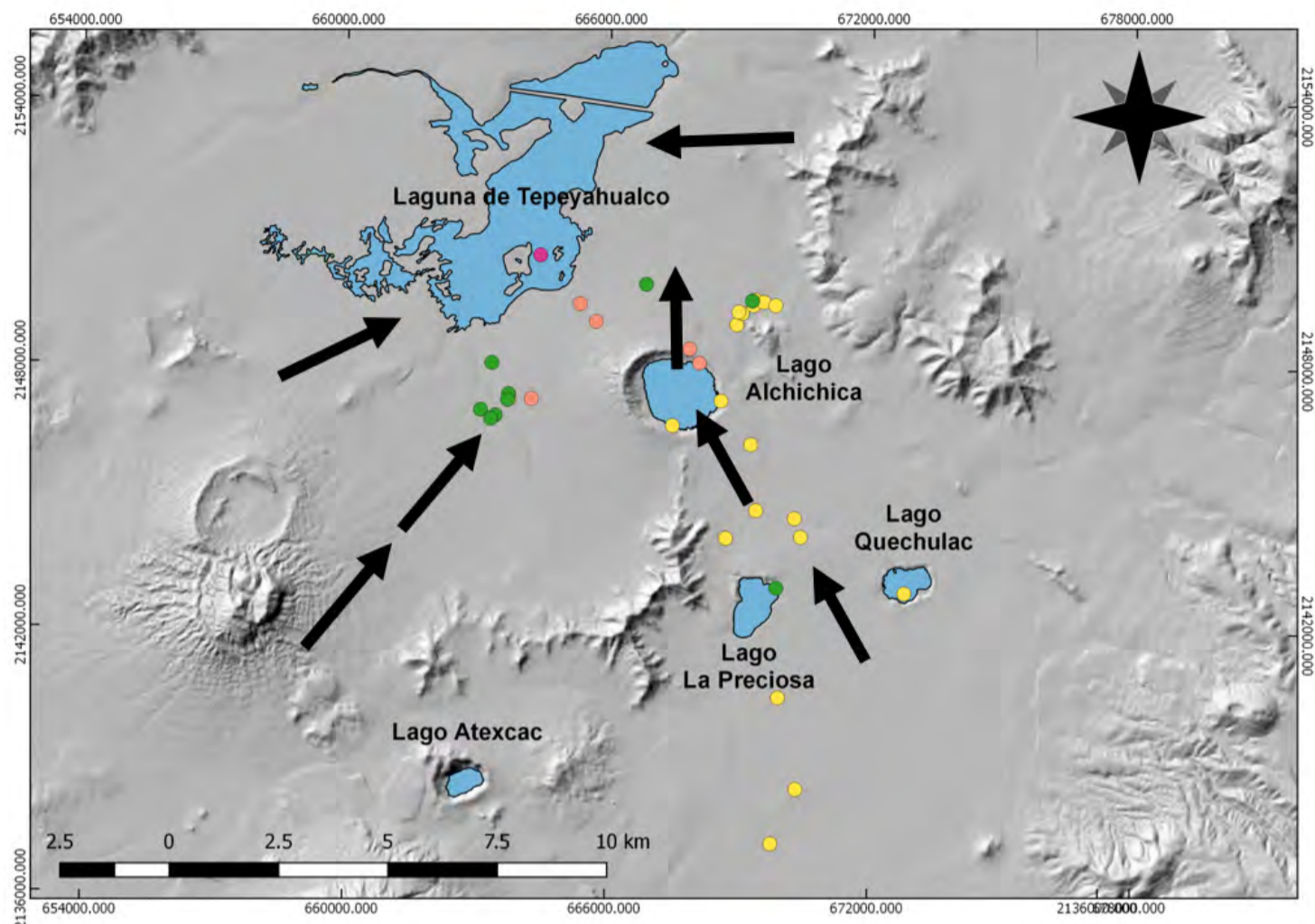


Figura 4.2. Esquema del Sistema de flujo Tepeyahualco en las periferias del lago Alchichica. Los círculos indican la ubicación de muestras de agua subterránea obtenidas y los colores —amarillo, naranja, verde y rosa— ilustran distintos grupos de agua diferenciados por su composición química, lo cual ayuda a confirmar los patrones de flujo preferencial de agua subterránea indicados por las flechas. (Figura tomada de Silva-Aguilera 2019).

A una escala más pequeña, si se enfoca la atención en la zona circundante al lago Alchichica, el flujo subterráneo se mueve en una dirección sureste-noroeste (Fig. 4.2). Una parte de este flujo intercepta los lagos Quechulac y La Preciosa y unos kilómetros más al noroeste intercepta también al lago Alchichica (Silva-Aguilera 2019).

Diversos estudios han permitido sugerir cómo es el flujo subterráneo a la escala del lago (Meneses 2002, Alcalá 2004, García 2010, Silva-Aguilera 2019). Existe al menos una zona de entrada de agua subterránea que se encuentra en el sector sureste del lago Alchichica. Por otro lado, en la zona

noroeste se efectúa la salida de agua desde el lago para integrarse al sistema de flujo (Fig. 4.3). Esto significa que el lago Alchichica no es el destino final de flujo de agua subterránea sino sólo es un paso en su camino, esto es, es un nivel base de descarga local del sistema de flujo, el cual continúa su camino hacia uno de los dos niveles base de descarga global, la laguna de Tepeyahualco, ubicada al noroeste del lago (aunque como se mencionó anteriormente, aparentemente hay también una componente del sistema que sigue hacia el norte y descarga en otras cuencas).

El agua subterránea, al alimentar al lago, le confiere las características químicas tan peculiares descritas en el capítulo *El cuerpo de agua*. Por otro lado, con base en las muestras de agua subterránea tomadas en *piezómetros* (dispositivos semejantes a los pozos pero a pequeña escala) instalados en la orilla del lago, en las zonas inferidas de entrada y salida de agua subterránea, se observa que la concentración de distintos iones disueltos aumenta en la salida con respecto a la entrada. Esto es un reflejo de cómo la evaporación que ocurre constantemente en la superficie del lago genera la concentración paulatina de algunos iones. Lo anterior explica por qué el agua del lago es salada y establece la diferencia entre el agua subterránea saliente con respecto a la entrante (Silva-Aguilera, 2019).

El hecho de que exista una estrecha relación entre el sistema de flujo de agua subterránea y el lago Alchichica no tiene implicaciones únicamente en sus características químicas, sino también en su *balance hídrico*. Se define como balance hídrico una cuantificación de los volúmenes de todos los flujos de agua entrantes y salientes, hacia y desde un sistema (por ejemplo, un lago, un río, un “acuífero” o incluso toda la cuenca). En el balance hídrico del lago Alchichica, las entradas de agua son la precipitación y el flujo subterráneo hacia el lago mientras que los flujos de salida son la evaporación directa desde la superficie del lago y el flujo subterráneo hacia el norte (esto engloba tanto la componente que va a la laguna de Tepeyahual-

co como la que se piensa que va a otras cuencas, lo cual se explicó en párrafos previos). Tanto el nivel del lago como el volumen de agua que almacena dependen del balance hídrico. Alcalá (2004) estimó el balance hídrico promedio anual del lago Alchichica cuyas cifras revelan que el agua subterránea es fundamental para la existencia y persistencia del lago Alchichica, pues el volumen de agua que se evapora anualmente es aproximadamente 1.7 veces mayor que el que precipita (Fig. 4.4). La captación de agua en las montañas circundantes de la cuenca Oriental y su percolación al subsuelo son de vital importancia ya que constituyen la fuente de agua subterránea que alimenta al lago Alchichica.

Un lago cambiante

El lago Alchichica ha cambiado desde su formación, la cual ocurrió durante el Holoceno, hace al menos 11,700 años como sugiere Carrasco-Núñez en el capítulo sobre el *Origen y formación del cráter*.

Es esperable que el nivel y volumen del lago hayan cambiado durante todo este tiempo en función del clima, pues éste también ha fluctuado (Metcalf *et al.* 2000). Estudios realizados en los microbitos que bordean al lago (ver el capítulo *Los texcales*) sugieren que el clima ha variado entre condiciones “húmedas” y condiciones “secas” durante los últimos tres mil años (Kazmierczak *et al.* 2011). Esto se traduce en variaciones en las condiciones de evaporación, precipitación y flujo de

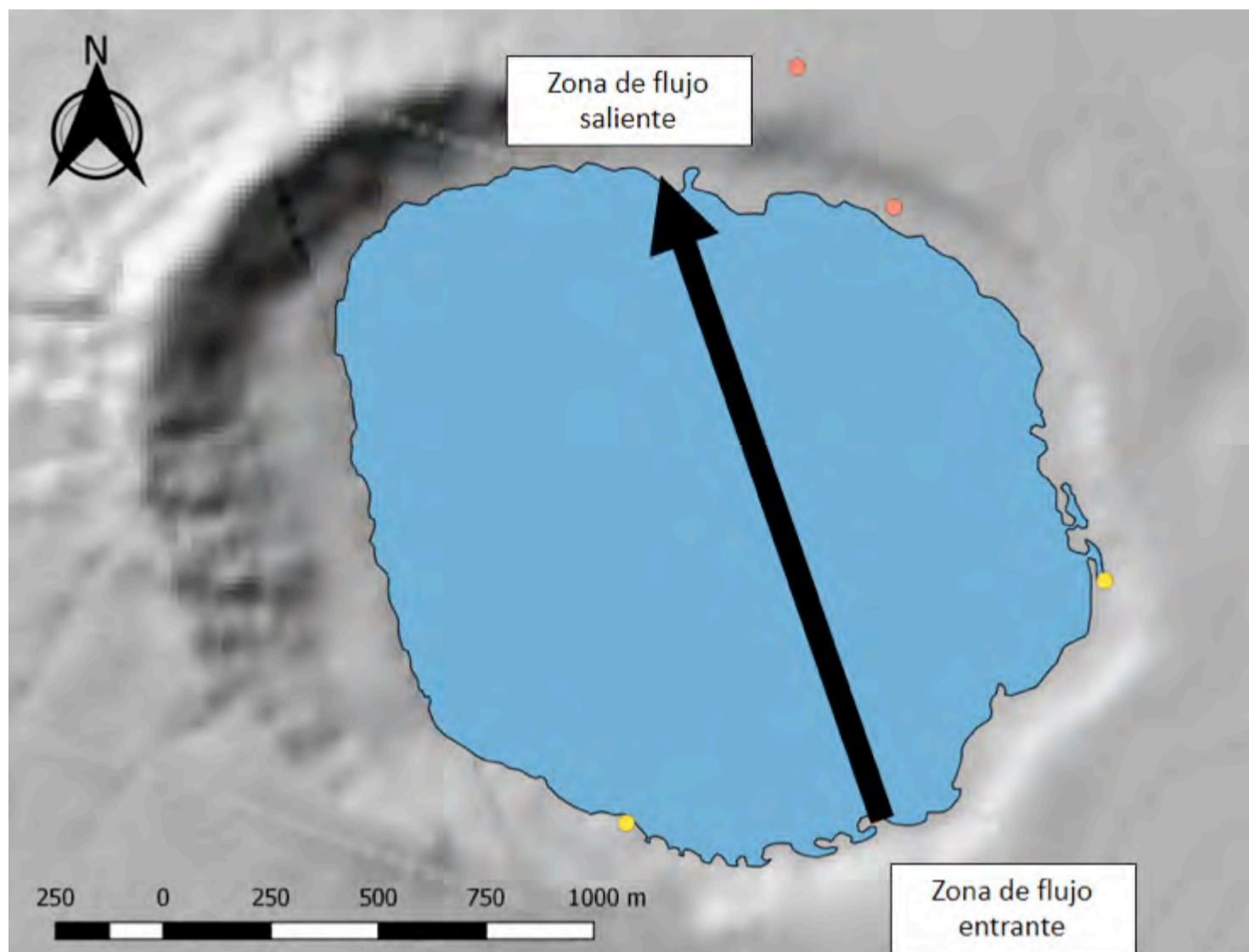


Figura 4.3. Esquema de interacción agua subterránea-lago Alchichica. Los círculos representan puntos en los que se han tomado muestras de agua subterránea y los diferentes colores ilustran las diferencias de composición entre la zona de entrada y la de salida. La flecha indica la dirección inferida del flujo. (Figura tomada de Silva-Aguilera 2019).

agua subterránea y por lo tanto, en cambios en el nivel del lago.

Alcocer y Escobar (2006) reportaron una disminución en el nivel del agua del lago Alchichica en las últimas décadas. Una evidencia muy clara es que los microbialitos que se formaron debajo del agua han quedado expuestos al aire aproximadamente dos metros por arriba de la superficie del agua. Los registros del nivel del lago del año 1959 a 1992 evidencian una disminución de 2.57 m en 34 años, esto es, 7.6 cm por año. Por otro lado, al considerar el nivel del lago medido por Alcalá-Rodríguez (2004) se ob-

serva que disminuyó 2.35 m en tan solo 12 años (1992 a 2004), es decir, disminuyó ¡casi 20 cm por año!

Las causas de la disminución del nivel en las últimas décadas han sido debatidas y recientemente analizadas (Silva-Aguilera 2019). Como ya se mencionó, existe un déficit por evaporación en el balance hídrico del lago, el cual conlleva una disminución en nivel del lago año con año (si se considera que las entradas por precipitación y el flujo de agua subterránea no han aumentado). Dicha disminución se observa en los registros incluso desde la época previa a la

explotación del agua subterránea en la zona (alrededor del año 1975). No obstante, el gran incremento en la tasa de disminución del año 1992 al 2004 la cual fue 2.6 veces mayor podría ser un reflejo del efecto retardado de la explotación del agua subterránea, creciente año con año, en el flujo de entrada al lago.

Desafortunadamente no se cuenta con registros de largo plazo del nivel del lago a la fecha, pero la evidencia visual en el lugar sugiere que el proceso de disminución continúa, pues los microbialitos cada vez se observan más expuestos. Por otro lado, en el pasado existían manantiales en la zona sureste del lago que reflejaban la descarga del agua subterránea en éste. En la actualidad estos manantiales ya no se observan, lo cual es una clara evidencia de que el nivel freático ha disminuido, presumiblemente a causa de la explotación del agua subterránea (Figura 4.5).

Otra prueba de la disminución del nivel del lago es la presencia de restos de los

que otrora fueran escalas de nivel para medir la variación del nivel del lago. La primera de ellas estaba a la misma altura de la estación climatológica, mientras que las otras tres, fueron colocadas cada vez más abajo conforme el nivel del lago disminuía. Los restos de las cuatro escalas están muy por encima de la orilla actual del lago (Fig. 4.6).

Lo más probable es que el nivel del lago esté disminuyendo debido a que las condiciones climáticas actuales favorecen significativamente la evaporación por encima de la precipitación y de la entrada de agua subterránea. Sin embargo, las evidencias sugieren que las actividades humanas (explotación de agua subterránea) están acelerando el proceso “natural”.

Conclusiones

El agua subterránea y los cuerpos de agua superficiales como los lagos tienen una relación estrecha, particularmente en condi-

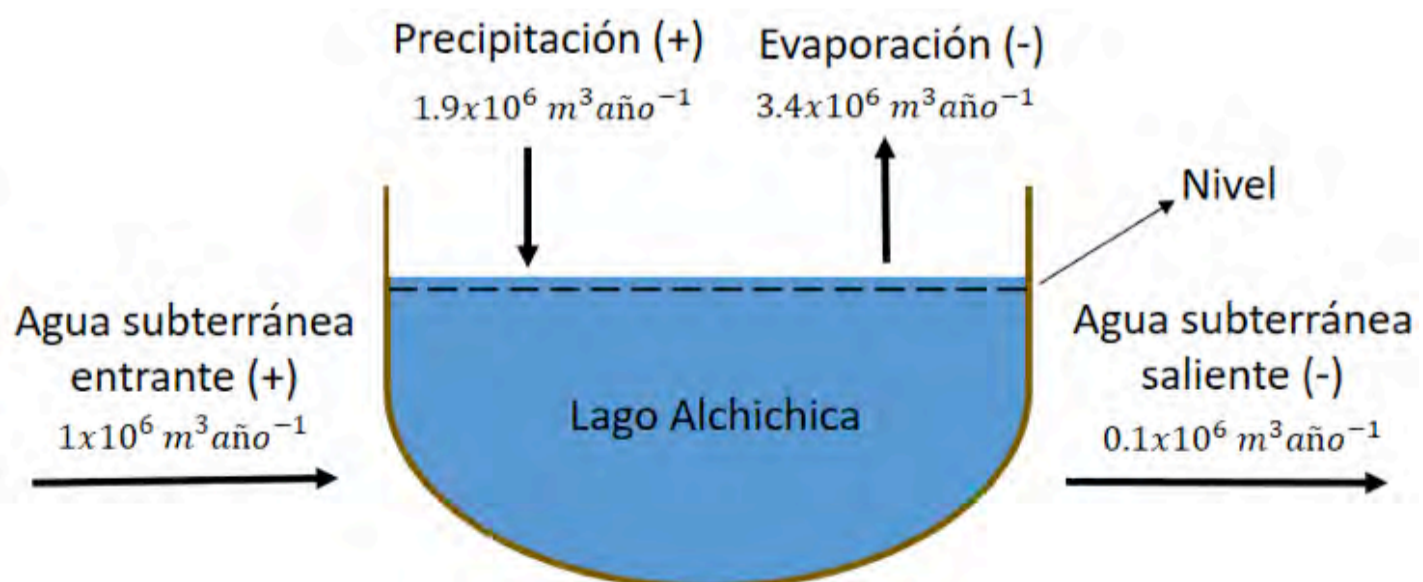


Figura 4.4. Esquema conceptual del balance hídrico del lago Alchichica en el cual se muestran todas sus componentes. Se resalta cómo el nivel (y por lo tanto el volumen) es función del balance neto. (Figura: Raúl Alberto Silva-Aguilera con datos de Alcalá, 2004).



Figura 4.5. Procedimiento de toma de muestra de agua en un manantial ubicado en la zona sur del lago Alchichica que hoy en día se encuentra seco. (Fotografía: Jorge García Martínez).

ciones geológicas y climáticas como las de la cuenca endorreica Serdán-Oriental. El agua subterránea juega un papel funda-

mental en la existencia y persistencia del lago Alchichica ya que por un lado es un componente fundamental en el balance hí-

drico del lago y por el otro le confiere las características químicas que lo hacen un sistema acuático tan único.

La persistencia del lago Alchichica es dependiente del clima, el cual a escala global está cambiando, y también de las actividades humanas como la explotación

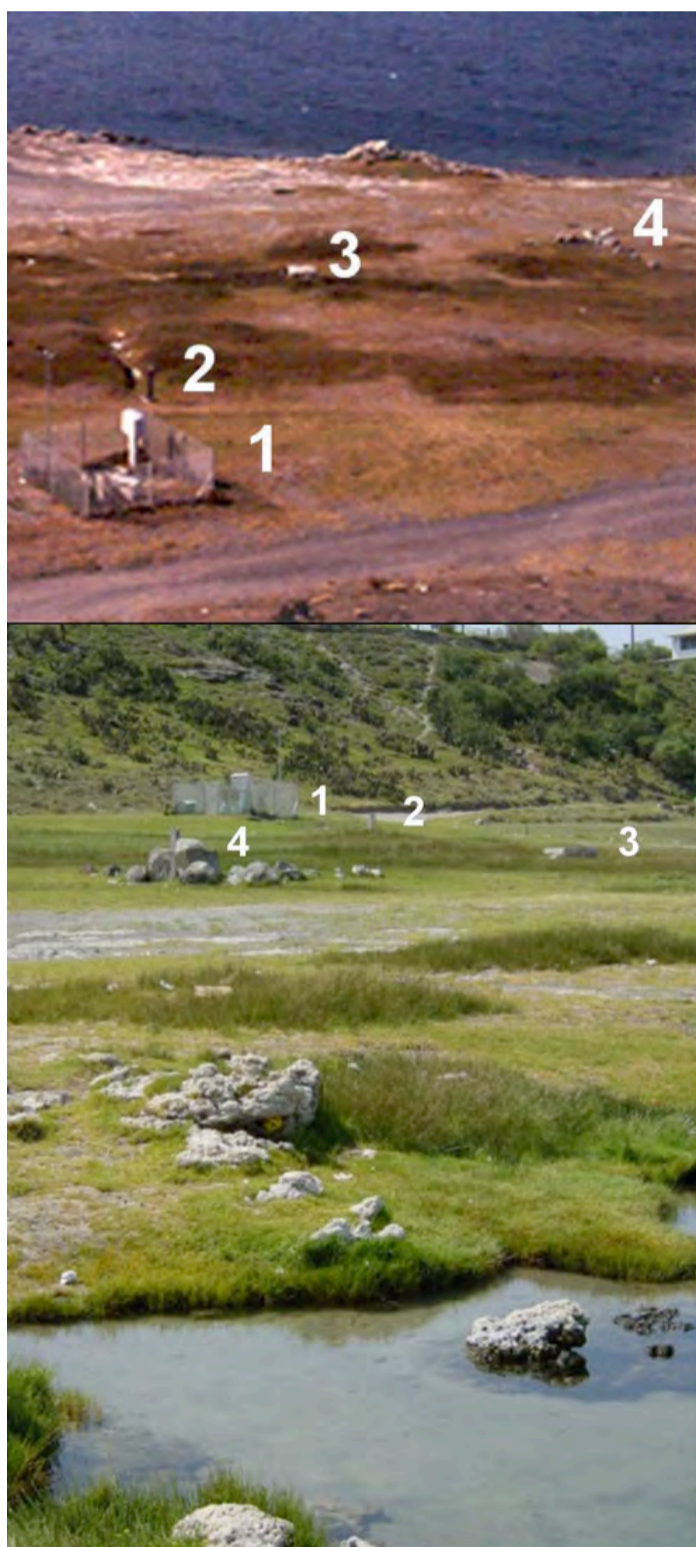


Figura 4.6. Evidencia de la disminución del nivel del lago Alchichica. Los restos de las distintas escalas de nivel están numerados del 1 al 4 donde se aprecia la distancia de las escalas al nivel actual del lago. (Fotografías: Javier Alcocer).

del agua subterránea asociada al creciente desarrollo urbano, agrícola, pecuario e industrial de la región.

Agradecimientos

RASA agradece al CONACyT por la beca 620579 para estudios de maestría y por la beca de movilidad para la realización de una estancia de investigación en la Universidad Politécnica de Cataluña bajo la supervisión de Emilio Custodio, a quien también se agradece por sus valiosos comentarios. A Javier Alcocer por haber dedicado tantos años de su vida al estudio del lago Alchichica, por su invitación para colaborar en este valioso volumen y por sus comentarios que enriquecieron este capítulo.

Referencias

- Adame, M. F., Alcocer, J. & Escobar, E. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31.
- Alcalá, A. 2004. Estudio hidrogeológico de Alchichica, estado de Puebla. Tesis de de Ingeniero Geólogo. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 52 pp.
- Alcocer, J., A. Lugo, M. R. Sánchez, M. Chávez & E. Escobar. 1998. Threats to the saline lakes of the Oriental basin, Mexico, by human activities. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 26: 1383-1386.

- Alcocer Durand, J., O. A. Escolero Fuentes & L. E. Marín Stillman. 2004. 3. Problemática del agua de la cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. pp. 57-77. En, B. Jiménez y L.E. Marín (eds.), D. Morán, O. Escolero & J. Alcocer (coords.). *El agua en México vista desde la Academia*. Academia Mexicana de Ciencias. México. 403 pp.
- Escolero, O. 2018. Sistemas regionales de flujo de agua subterránea. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Jiutepec, Morelos, México. 466 pp.
- García, J. 2010. Efectos climáticos sobre el agua subterránea y el lago Alchichica Puebla, México. Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 144 pp.
- Kaźmierczak, J., S. Kempe, B. Kremer, P. López-García, D. Moreira & R. Tavera, 2011. Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica, Mexico. *Facies* 57: 543-570.
- Meneses, L. 2002. Exploración geofísica e hidrogeológica en la laguna de Alchichica, cuenca de Libres-Oriental, estado de Puebla. Tesis de Ingeniero Geofísico. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 78 pp.
- Metcalf, S. E., S. L. O'Hara, M. Caballero & S. J. Davies. 2000. Records of Late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico—a review. *Quaternary Science Reviews* 19: 699-721.
- Reyes, M. 1979. Geología de la cuenca de Oriental. Estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. Colección Científica Prehistoria 71. Instituto Nacional de Antropología e Historia, SEP. México. 62 pp.
- Silva-Aguilera, R. 2019. Análisis del descenso del nivel del agua en el lago de Alchichica, Puebla. Tesis de Maestría en Ciencias del Mar y Limnología. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 115 pp.
- Cruickshank Villanueva, C. 1992. Relación entre las aguas superficiales y las subterrá-

neas en una cuenca. *Ingeniería Hidráulica en México* enero/abril: 56-63

Contacto

Raúl A. Silva-Aguilera. Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México. raul.s@ciencias.unam.mx

Óscar Escolero. Departamento de Dinámica Terrestre Superficial, Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.





El cuerpo de agua

Javier Alcocer

Luis A. Oseguera

La forma de Alchichica es casi circular, con un diámetro de 1.73 km y un perímetro de alrededor de 5 km. Es pequeño, con una superficie de 2.3 km², pero por ser profundo contiene un volumen de aproximadamente 95 millones de metros cúbicos de agua. La forma de la cuenca del lago recuerda la de una cubeta (Fig. 5.1), lo cual es característico de los lagos volcánicos tipo “*maar*”, esto es, originados de una explosión freatomagmática.

La profundidad máxima alcanza los 62 m y la profundidad promedio es de 40.9 m (Filonov *et al.* 2006), lo cual lo ubica en el octavo lugar entre los lagos más profundos de México (Alcocer *et al.* 2016). Con una zona litoral prácticamente inexistente hoy

en día el lago alcanza rápidamente profundidad muy cerca de la orilla. Por ejemplo, a unos 5 m del borde, la profundidad del lago puede alcanzar 35 o 40 m.

Otrora, el lago presentaba una amplia zona litoral que fue desapareciendo conforme el nivel de sus aguas descendía lo cual se evidencia fácilmente al observar los depósitos de estromatolitos que fueron formados dentro del agua y que ahora están expuestos al aire (Alcocer y Escobar-Briones 2007).

Alchichica es alimentado principalmente por aguas subterráneas. Lo anterior es evidente cuando se analiza el balance hídrico de la zona en donde la evapotranspiración (1,690 mm año⁻¹) triplica la precipitación (< 500 mm año⁻¹), dando un balance

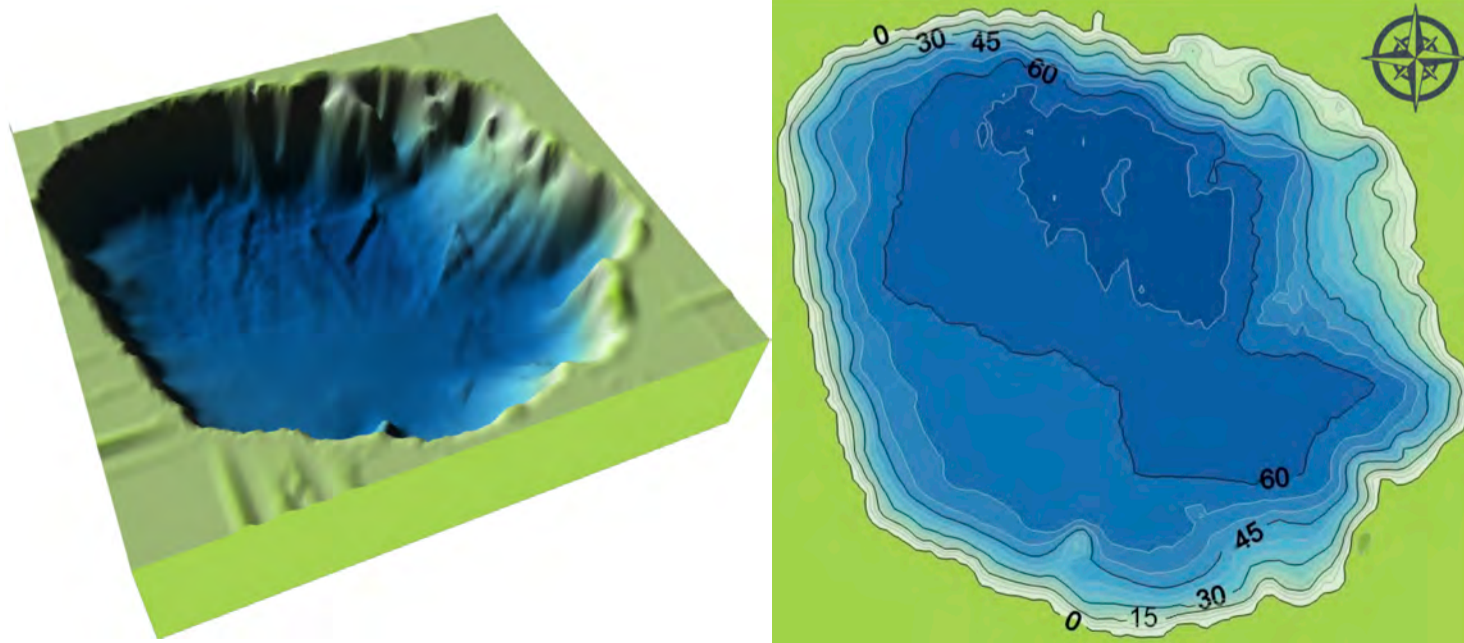


Figura 5.1. Batimetría del lago Alchichica. Izquierda en 3D, derecha en 2D). (Profundidad del lago). (Figuras: Raúl A. Silva-Aguilera y Mariana Vargas-Sánchez).

Tabla 5. 1. Composición química de las aguas del lago Alchichica. [Concentraciones en mg L⁻¹, alcalinidad en mg L⁻¹ CaCO₃. (AT = alcalinidad total, AF = alcalinidad a la fenolftaleína)] (Armienta *et al.* 2008).

| At | Af | Na ⁺ | K ⁺ | Ca ²⁺ | SO ₄ ²⁻ | Cl ⁻ | B | SiO ₂ | CO ₃ ²⁻ | HCO ₃ ⁻ |
|------|-----|-----------------|----------------|------------------|-------------------------------|-----------------|----|------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 2114 | 736 | 2,388 | 233 | 11 | 996 | 3,115 | 47 | <1 | 883 | 782 |

negativo de -1,100 mm año⁻¹ (Adame *et al.* 2008). Si no tuviera un aporte de agua subterránea importante, el lago se hubiera secado hace mucho tiempo (ver Capítulo *El agua subterránea y el lago*).

La elevada evaporación derivada del clima árido y frío predominante en la zona, en conjunción con las características de la mineralización de las aguas subterráneas que alimentan el lago explican por qué las aguas de Alchichica son saladas. Contiene aproximadamente entre 8.5 y 9 gramos de sales disueltas en cada litro de agua (con una conductividad eléctrica aproximada de 12.9 mS cm⁻¹). Esta cantidad es relativamente baja si se compara con la salinidad del mar que alcanza los 35 gramos de sal por cada litro de agua. Sin embargo, contiene el triple de sales que la típica “agua dulce” que tiene menos de 3 gramos de sal por litro.

A pesar de la diferencia de salinidad con el mar, la sal dominante en las aguas marinas y de Alchichica es el cloruro de sodio o sal común (Tabla 5.1). Sin embargo, en Alchichica las sales de magnesio, carbonatos y bicarbonatos son proporcionalmente más elevados que en el mar; además, destaca la presencia de boratos en las aguas del lago. La composición química del agua con una elevada alcalinidad se refleja en un pH con valores entre 8.8-8.9, lo cual

caracteriza a las aguas como alcalino sódicas. Esta composición química de las aguas de Alchichica es producto de la combinación de las aguas ricas en sodio procedente de los materiales volcánicos (el magma), los bicarbonatos que derivan de las rocas calizas marinas y, como se mencionó, del efecto de concentración y saturación que conlleva la elevada evaporación (Armienta *et al.* 2008).

Una de las características que hace cautivante al lago es su hermoso color azul; éste varía del azul turquesa cerca de la orilla hasta el azul marino en la zona profunda. Alchichica mantiene este color azul casi todo el año. Aunque las aguas son en general transparentes, se pueden distinguir claramente dos épocas (Fig. 5.2). La primera se denomina de “aguas turbias” en la cual la luz del Sol alcanza hasta un máximo de casi 24 m de profundidad y se presenta en el invierno (enero-marzo), cuando el lago está mezclado y circulando como se explica más adelante. La turbidez del lago se deriva de la presencia de partículas en suspensión, de las cuales la mayor parte están constituidas por organismos (fitoplancton), lo que se denomina turbidez biogénica, mientras que las partículas de origen terrígeno (arcillas, limos) o turbidez terrígena, son las menos (Oseguera *et al.* 2011). Ahora bien, la turbi-

dez del agua de la época de “aguas turbias” se debe a un incremento repentino (floreamiento) de fitoplancton, en este caso, de diatomeas, las cuales enturbian el agua (ver Capítulo *El alga dorada*). La segunda época, la de “aguas claras”, se presenta en el resto del año abril-diciembre, es donde la luz del Sol alcanza mayores profundidades, hasta un máximo de casi 40 m. La mayor transparencia se debe a la escasa presencia de fitoplancton.

Sin embargo, hay que mencionar que dentro de la época de aguas claras, hay un momento alrededor de mayo o junio, en donde la transparencia disminuye debido al desarrollo de un florecimiento de fitoplancton, pero en este caso es de una cianobacteria filamentosa que flota y se acumula en la superficie del agua (ver Capítulo *La lama*) y

el lago se torna verde (Fig. 5.3). Aunque, pasado este breve periodo de tiempo, la transparencia vuelve a aumentar.

A pesar de su ubicación dentro del cinturón tropical (19°N), la elevada altitud (2,300 m s.n.m.) atempera las aguas de Alchichica que pueden considerarse frías. Aunque en la superficie pueden alcanzar los 22°C en los meses más cálidos, un poco por debajo de ésta la temperatura baja súbitamente. En promedio, la temperatura de la columna de agua es de 15.5°C e incluso puede alcanzar los 14-14.5°C en enero y febrero, los meses más fríos.

El patrón térmico del lago es de monomixis cálida (Fig. 5.4), esto es, que la columna de agua del lago se mezcla totalmente cuando la temperatura está homogéneamente fría, o sea, éste circula durante el frío y seco

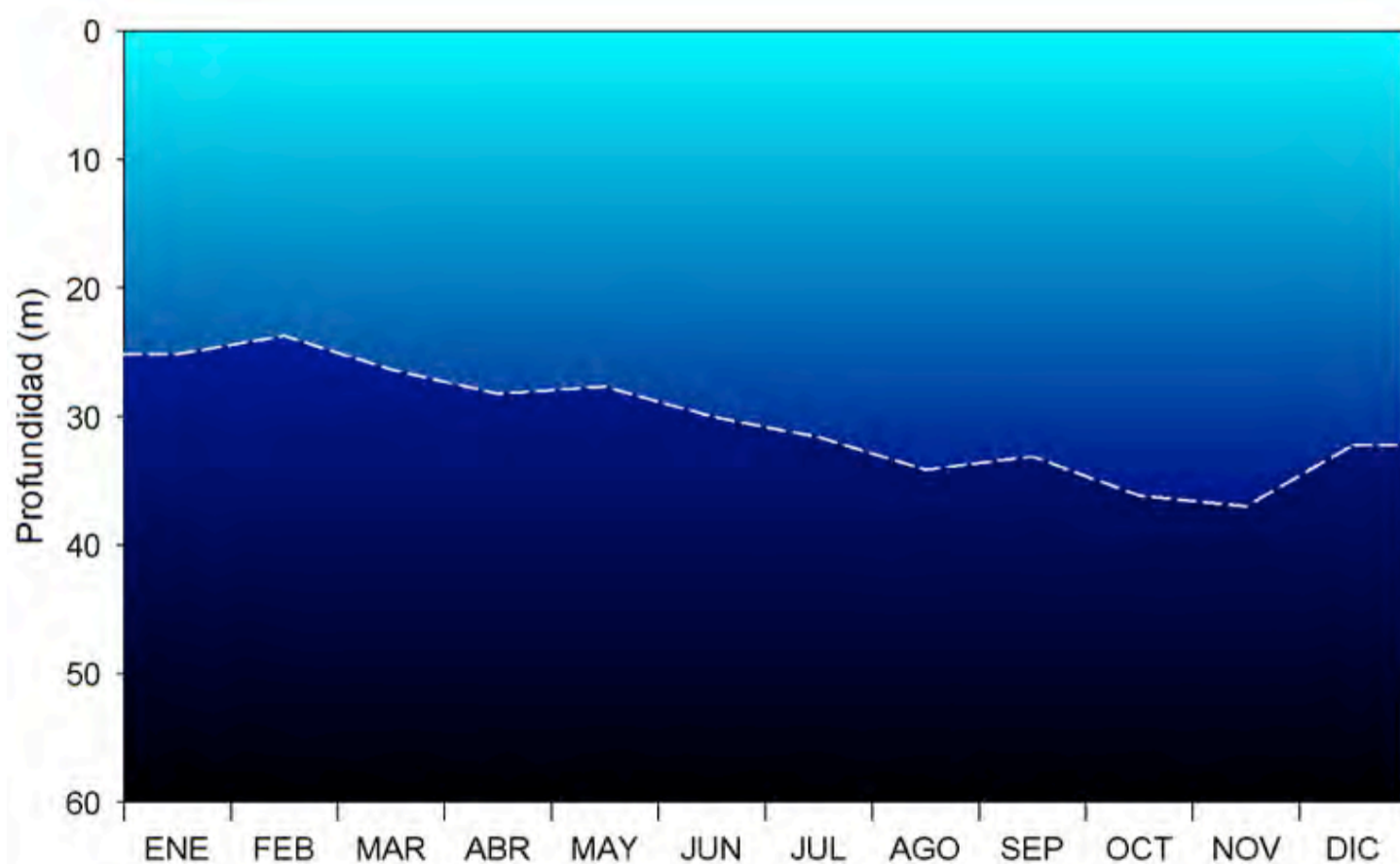


Figura 5.2. Dinámica anual de la zona eufótica —hasta donde alcanza a llegar la luz del Sol— en la columna de agua del lago Alchichica. (Figura: José Daniel Cuevas Lara y Luis A. Oseguera Pérez).



Figura 5.3. Aguas verdes y turbias del lago Alchichica durante el florecimiento de *Nodularia* aff. *spumigena* a medio lago (izquierda) y su acumulación en la orilla (derecha). En el inserto se presenta la condición normal de transparencia del lago. (Fotografías: Javier Alcocer).

invierno (enero-marzo), para luego estratificarse térmicamente el resto del año (abril-diciembre).

Esto es, durante la primavera, cuando el sol comienza a calentar la capa superficial del lago se vuelve más ligera (menos densa) y por lo tanto flota sobre la capa más profunda y fría (más densa). Así, conforme avanza el año, en verano y otoño, las capas superficiales se tornan cada vez más cálidas mientras que las profundas permanecen frías. De esta manera se forman dos estratos de agua, el superior más cálido y

ligero (denominado epilimnion) y el inferior más frío y pesado (denominado hipolimnion), separados por una capa intermedia, el metalimnion, en donde la temperatura cambia rápidamente de cálida a fría (la termoclina).

De esta manera, el lago permanece dividido en dos a lo largo de la época cálida y lluviosa. Cuando se acerca fin de año y la temperatura disminuye en el invierno, la capa superficial o epilimnion se va enfriando hasta que llega un momento en el cual adquiere la misma temperatura del

agua de fondo o hipolimnion; al no haber ya barrera térmica/densidad entre ambas, nada impide que el viento lleve a que toda la masa de agua circule y se mezcle.

Cuando está presente, la termoclina impide que el viento lleve a cabo la mezcla total de la columna de agua. Sin embargo, si bien por las noches y las mañanas hay condiciones de viento en calma, de medio día y en la tarde el viento forma una brisa que induce que el epilimnion se mezcle todos los días y permanezca más o menos homogéneo (Filonov *et al.* 2006). Las aguas frías y limpias de Alchichica poseen una concentración de oxígeno disuelto elevada que típicamente alcanza la saturación (100%) en la superficie, esto es, mantiene la cantidad máxima posible de oxígeno disuelto en el agua. Sin embargo, al inicio del año, el oxí-

geno disuelto disminuye (hasta un 25% de saturación) por breves periodos por consumo cuando el lago comienza a circular (enero); por otro lado, a mediados de año, el oxígeno aumenta (hasta un 140% de saturación) por breves periodos por producción primaria (Fig. 5.5).

Cuando el lago se encuentra totalmente mezclado y circulando, la concentración de oxígeno disuelto es elevada y homogénea; sin embargo, en cuanto el lago se estratifica térmicamente y se separa la capa del fondo (hipolimnion) de la superficial (epilimnion), la concentración de oxígeno disuelto comienza a disminuir por consumo en el primero, mientras que se mantiene elevado y cerca de la saturación en el segundo.

Así, aproximadamente en el mes de mayo, en la capa más pegada al fondo se

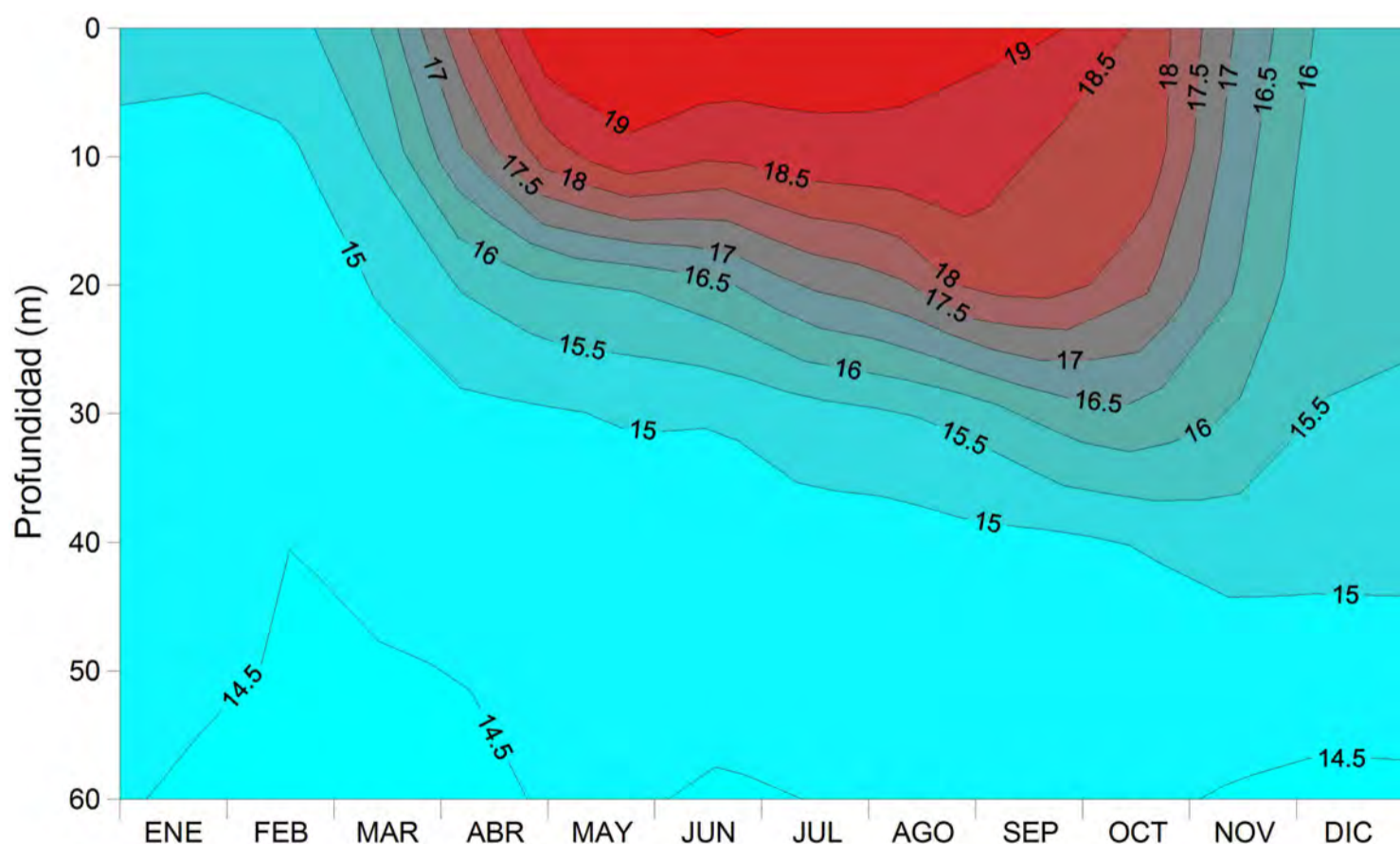


Figura 5.4. Dinámica anual de la temperatura (en °C) de la columna de agua del lago Alchichica. (Azul indica temperaturas más frías, rojo indica temperaturas más cálidas). (Figura: José Daniel Cuevas Lara y Luis A. Oseguera Pérez).

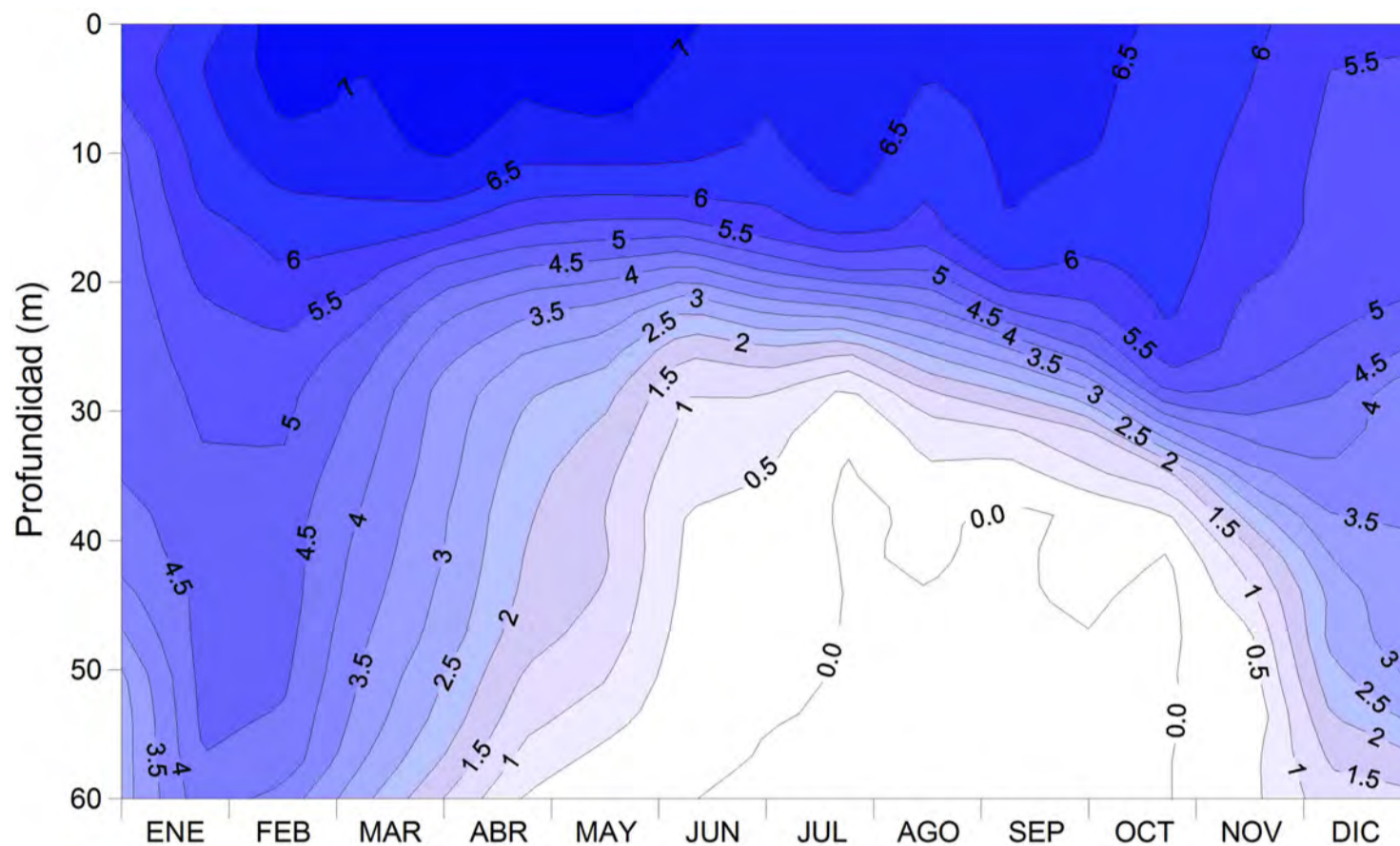


Figura 5.5. Dinámica anual de la concentración de oxígeno disuelto (en mg L^{-1}) de la columna de agua del lago Alchichica. (Figura: José Daniel Cuevas Lara y Luis A. Oseguera Pérez).

acaba el oxígeno disuelto y se generan condiciones de anoxia o sea, ausencia de oxígeno. La capa anóxica va engrosando con el paso del tiempo hasta que, entre agosto y diciembre, todo el hipolimnion se ha convertido en anóxico (Fig. 5.5).

Al estar totalmente separados el epilimnion del hipolimnion por la capa del metalimnion, los procesos de consumo de oxígeno en el hipolimnion (degradación de la materia orgánica) conllevan a que este gas se termine y el hipolimnion se torne en un ambiente anóxico. Al contrario, en el epilimnion tanto la liberación de oxígeno derivado del proceso fotosintético como la disolución de este gas desde la atmósfera al agua, mantienen bien oxigenado el epilimnion.

Alchichica es un lago oligotrófico, esto es, poco productivo, lo que significa que tie-

ne una baja cantidad de fitoplancton. Como se mencionó, la baja cantidad de fitoplancton provoca que sus aguas sean transparentes y azules (Fig. 5.6). La baja productividad primaria del lago deriva del hecho de que tiene una baja concentración de nutrientes, los compuestos químicos que fertilizan las aguas y permiten que el fitoplancton se desarrolle.

La cantidad disponible de estos nutrientes, en particular fósforo y nitrógeno, es lo que limita la productividad primaria en Alchichica (Ramos-Higuera *et al.* 2008, Ramírez-Olvera *et al.* 2009).

En el caso especial de Alchichica la sílice también es relevante ya que el fitoplancton está compuesto por gran cantidad de diatomeas que construyen su cubierta a partir de este elemento. De forma extraña,

aunque la sílice es un elemento muy escaso en las aguas del lago, la mayor biomasa del fitoplancton lo constituyen las diatomeas.

La dinámica anual de los nutrientes en el lago está muy asociada al patrón térmico de monomixis cálida. Cuando el lago circula y se mezcla en invierno, los nutrientes que estaban atrapados en los sedimentos del lago (organismos que murieron y se depositaron al fondo) y que son producto de la descomposición de la materia orgánica por parte de los microorganismos (bacterias) se liberan y fertilizan las aguas del lago. En respuesta a ello, el fitoplancton, en este caso principalmente las diatomeas, crecen de forma explosiva y conforman el florecimiento invernal que, como se mencionó con antelación, hace que el agua se torne más turbia. Sin embargo, conforme pasa el tiempo, los nutrimentos se agotan al ser consu-

midos por las diatomeas para crecer y reproducirse de manera que su cantidad disminuye notablemente (Fig. 5.7).

Al comenzar la primavera, cuando da inicio la estratificación térmica (estratificación temprana) los nutrientes del lago, en particular el nitrógeno, son ya muy escasos. Lo anterior, en forma conjunta con la aún presencia de fósforo, favorecen el desarrollo de otro florecimiento de fitoplancton, pero ahora por parte de una cianobacteria fijadora de nitrógeno (ver capítulo *La lama*).

Conforme la estratificación térmica se establece, se separan el epilimnion o capa superficial ahora ya prácticamente sin nutrientes, del hipolimnion o capa profunda a la que han alcanzado grandes cantidades de materia orgánica que se sedimenta, principalmente, en forma de diatomeas procedentes del florecimiento invernal (Ardiles *et al.*



Figura 5.6. Panorámicas del lago Alchichica en donde se denota lo azul límpido de sus aguas. (Fotografía: Mariana Vargas-Sánchez).

2012). Los microorganismos descomponen la materia orgánica muerta y al mismo tiempo el oxígeno disuelto disponible se consume hasta que, alrededor del mes de mayo, se forma una capa anóxica encima de los sedimentos. Más aún, como los microorganismos degradan la materia orgánica y consumen el oxígeno disuelto disponible, la capa anóxica se engruesa hasta que abarca todo el hipolimnion que se torna totalmente anóxico (Fig. 5.7).

La degradación de la materia orgánica por parte de los microorganismos la transforma nuevamente a materia inorgánica, esto es, en nutrientes. Éstos se acumulan en el hipolimnion de forma tal que, para finales de la época de estratificación, el hipolimnion se ha enriquecido en nutrientes, los cuales permanecen atrapados ahí. Al inicio del año, cuando el lago vuelve a circular, se distribuyen a lo largo de la columna de agua y quedan disponibles para ser utilizados nuevamente por el fitoplancton. De igual forma, la materia orgánica que no alcanzó a degradarse por falta de oxígeno disuelto, por un lado se queda atrapada en los sedimentos (Alcocer *et al.* 2014), mientras que por el otro lado, al iniciar la circulación y entrar una dotación nueva de oxígeno, ésta rápidamente se oxida y con ello explica la disminución en la concentración de oxígeno disuelto que se aprecia justo al inicio del periodo de mezcla del lago.

Una aproximación para conocer la cantidad de fitoplancton (que tan productivo es) presente en la columna de agua es medir la concentración de la clorofila-a, pigmento

fotosintético presente en todos los organismos fotosintéticos. Para el caso de Alchichica que, como se ha mencionado antes, es un lago poco productivo (Oseguera *et al.* 2015) ya que tiene pocos nutrientes y por ende, presenta concentraciones reducidas de clorofila-a, por lo cual permanece transparente la mayor parte del año.

A lo largo del año la distribución vertical de la concentración de clorofila-a muestra tres periodos bien diferenciados (González-Contreras *et al.* 2015). Así, en el primer periodo, durante los meses de enero a marzo, se aprecian concentraciones altas de clorofila-a ($2.5-15.1 \text{ mg m}^{-3}$) y con una distribución más o menos homogénea en toda la columna de agua que están asociadas al florecimiento invernal de diatomeas (Fig. 5.8). Este periodo coincide con el periodo de circulación, cuando los nutrientes atrapados en el hipolimnion son liberados en toda la columna de agua.

De abril a junio, al terminar la etapa de circulación y durante la formación de la estratificación, se presenta el segundo periodo en donde se puede apreciar una disminución general, a partir de los 20 m aproximadamente, en la concentración de clorofila-a, pero aun así mantiene concentraciones altas ($>3 \text{ mg m}^{-3}$) en la parte superior epilimnion.

Durante el mes de mayo o junio se presenta un incremento en la concentración superficial promedio del año ($\approx 3 \text{ mg m}^{-3}$), en los 5 m superficiales. Este incremento en la concentración de clorofila-a, responde al florecimiento primaveral de la cianobacteria *Nodularia aff. spumigena* (Oliva *et al.* 2009),

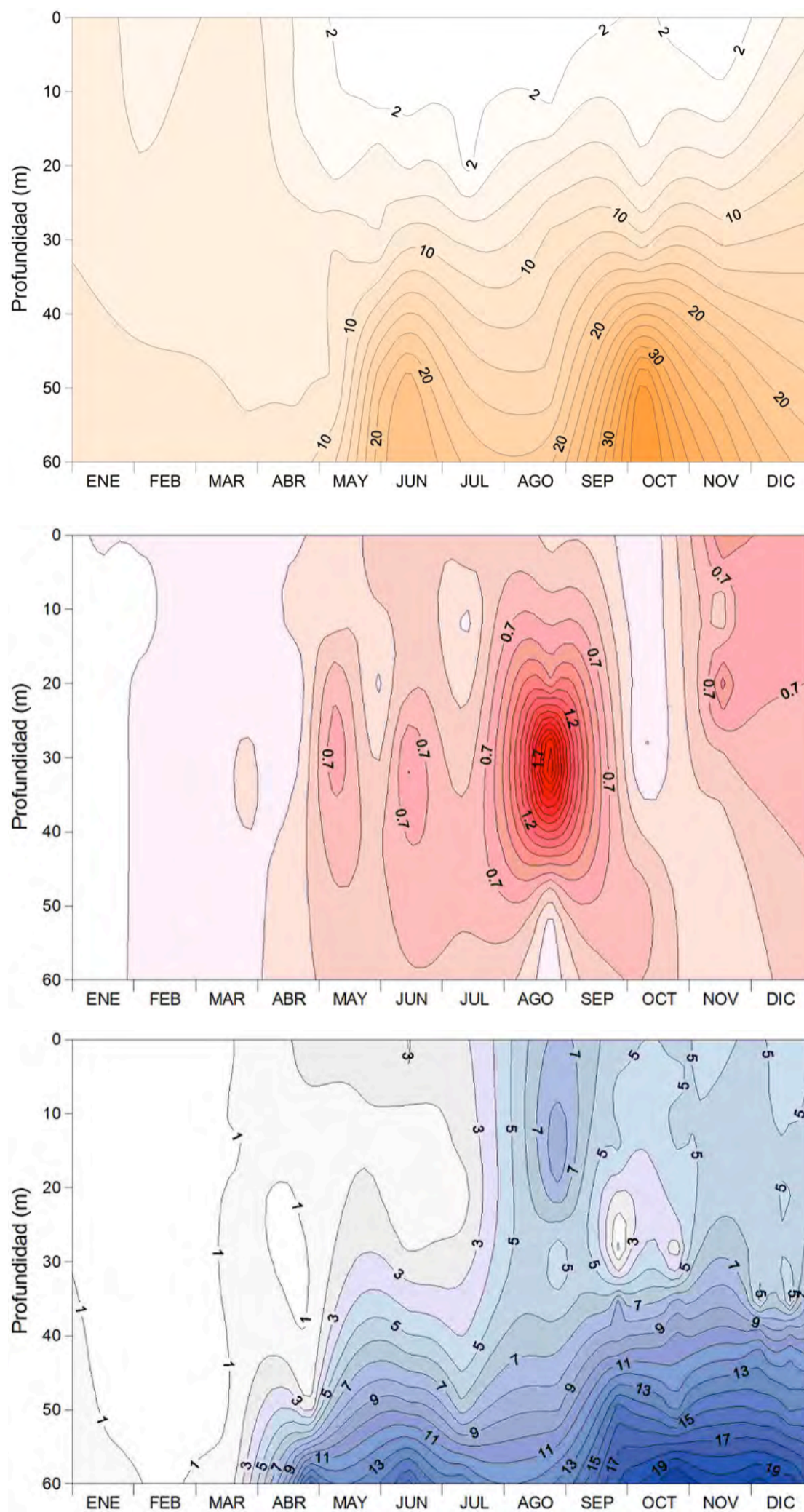


Figura 5.7. Dinámica anual de la concentración de nutrientes (en μM) de la columna de agua del lago Alchichica. Nitrógeno inorgánico disuelto (NID = $\text{NH}_4 + \text{NO}_2 + \text{NO}_3$) (naranja, arriba), fósforo soluble reactivo (rojo, en medio) y sílice soluble reactiva (azul, abajo). (Figuras: Vilma Ardiles Gloria y Luis A. Oseguera Pérez).

coincidente con la estratificación temprana (Fig. 5.8).

De julio a noviembre, durante la estratificación bien establecida y tardía, la concentración de la clorofila-a disminuye drásticamente en el epilimnion, sin embargo, se desarrolla gradualmente un máximo profundo de clorofila en el metalimnion. En el transcurso de este periodo el máximo profundo de clorofila tiende a profundizarse y a aumentar su concentración de clorofila-a hasta alcanzar la mayor intensidad durante el mes de septiembre u octubre con un promedio superior a 20 mg m^{-3} pero pudiendo alcanzar valores $>30 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 5.8). Finalmente, en noviembre la concentración disminuye por debajo de los 2 mg m^{-3} , para que, en diciembre, cuando se debilita la estratificación, la termoclina se pro-

fundiza y adelgaza por la cercanía del nuevo periodo de circulación, la concentración de clorofila-a vuelve a incrementarse $>3 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 5.8).

En resumen, el periodo con mayores concentraciones de clorofila-a en toda la columna de agua es la circulación con $9.5 \pm 3.2 \text{ mg m}^{-3}$, seguido de la estratificación bien establecida con $2.8 \pm 5.8 \text{ mg m}^{-3}$, la estratificación tardía con $2.3 \pm 1.2 \text{ mg m}^{-3}$ y, finalmente, la estratificación temprana con $2.1 \pm 1.3 \text{ mg m}^{-3}$.

Es importante mencionar que las diatomeas, en particular *Cyclotella alchichicana*, forman la mayor parte del florecimiento invernal que se distribuye en toda la columna de agua, así como la mayor parte del máximo profundo de clorofila que se ubica en el metalimnion. Por otro lado, el

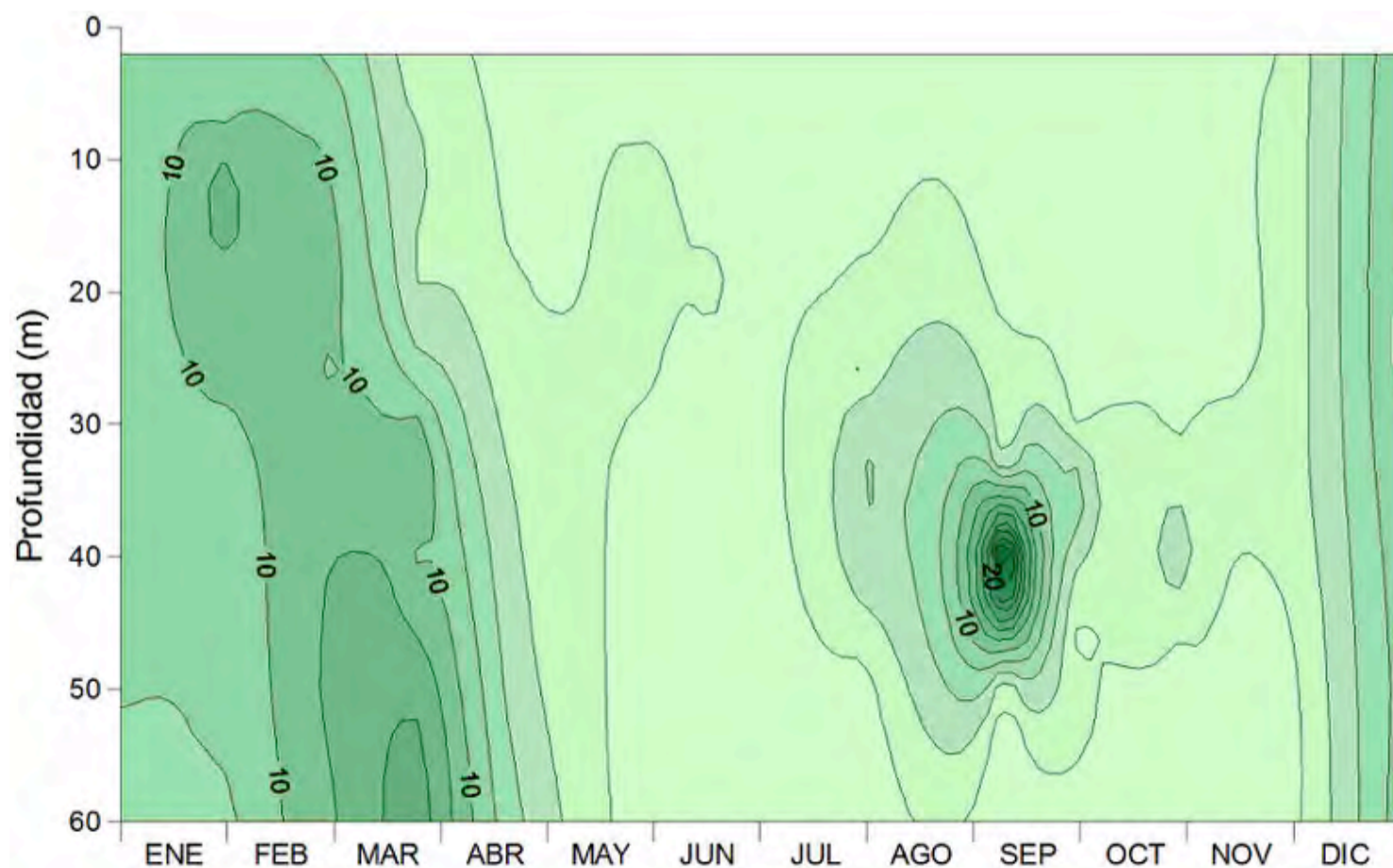


Figura 5.8. Dinámica anual de la concentración de la clorofila-a (en mg m^{-3}) de la columna de agua del lago Alchichica. (Figura: José Daniel Cuevas Lara y Luis A. Oseguera Pérez).

floreCIMIENTO primaveral lo compone *No-dularia* aff. *spumigena* y se acumula en la capa superficial.

Como se puede apreciar en los párrafos anteriores, es muy claro que el patrón térmico del lago, la monomixis cálida, regula la hidrodinámica (periodo de circulación y estratificación) lo cual a su vez regula la mayoría de las variables y procesos del lago (Alcocer *et al.* 2000). Tras 20 años de estudio continuo se ha evidenciado que Alchichica es un lago muy regular manteniendo un patrón térmico prácticamente inalterado.

Agradecimientos

Innumerables han sido las aportaciones realizadas al estudio del lago Alchichica a lo largo de 20 años. Muchas personas, académicos y estudiantes, han dedicado arduas horas de trabajo en campo, laboratorio y escritorio para dar como resultado el que quizá sea el lago mexicano más estudiado, en profundidad y a lo largo del tiempo. Basta mencionar los proyectos que han permitido apoyar financieramente el monitoreo a lo largo de 20 años: Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (0956-N9111, 25430-T, 34893-T, 41667, 49923, 103332, 224893, 52387, 79893, 131689), Dirección General de Asuntos del Personal Académico PAPIIT (IN204597, IN210806-3, IN221009, IN215512, IN208502, IN207206, IN225517) y FES Iztacala Programa de Apoyo a los Profesores de Carrera (2002-03, 2006-07, 2007-08, 2009-10, 2013-14, 2014-15). Los autores

extienden un agradecimiento especial al Dr. Martín Merino y al M. en C. F. Sergio Castillo-Sandoval por el apoyo técnico en el análisis de nutrientes.

Referencias

- Adame, M. F., J. Alcocer & E. Escobar-Briones. 2008. Size-fractionated phytoplankton biomass and its implications for the dynamics of an oligotrophic tropical lake. *Freshwater Biology* 53: 22-31.
- Alcocer, J., A. Lugo, E. Escobar, M. R. Sánchez & G. Vilaclara. 2000. Water column stratification and its implications in the tropical warm monomictic lake Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 27: 3166-3169.
- Alcocer, J. & E. Escobar-Briones. 2007. On the ecology of *Caecidotea williamsi* Escobar-Briones & Alcocer (Crustacea: Isopoda: Asellidae) from Alchichica saline lake, Central Mexico. *Hydrobiologia* 576: 103-109.
- Alcocer, J., A. C. Ruiz-Fernández, E. Escobar, L.H. Pérez-Bernal, L.A. Oseguera & V. Ardiles-Gloria. 2014. Deposition, burial and sequestration of carbon in an oligotrophic, tropical lake. *Journal of Limnology* 73: 223-235.
- Alcocer J., L. A. Oseguera, G. Sánchez, C. G. González, J. R. Martínez y R. González. 2016. Bathymetric and morphometric surveys of the Montebello lakes, Chiapas. *Journal of Limnology* 75: 56-65.
- Ardiles, V., J. Alcocer, G. Vilaclara, L. A. Oseguera & L. Velasco. 2012. Diatom fluxes in a tropical, oligotrophic lake dominated by large-sized phytoplankton. *Hydrobiologia* 679: 77-90.
- Armienta M. A., G. Vilaclara, S. De la Cruz-Reyna, S. Ramos, N. Cenicerros, O. Cruz, A. Aguayo & F. Arcega-Cabrera. 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178: 249-258.
- Filonov, A., I. Tereshchenko & J. Alcocer. 2006. Dynamic response to mountain breeze cir-

- culation in Alchichica, a crater lake in Mexico. *Geophysical Research Letters* 33: L07404.
- González Contreras, C. G., J. Alcocer & L. A. Oseguera. 2015. Clorofila a fitoplanctónica en el lago tropical profundo Alchichica: un registro de largo plazo (1999-2010). *Hidrobiológica* 25: 347-356.
- Oliva, M. G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta & L. A. Oseguera. 2009. Planktonic bloom forming *Nodularia* in the saline Lake Alchichica, Mexico. 121-126. En Oren, A., Naftz, D. L., & Wurtsbaugh, W. A. (Eds.). *Saline lakes around the world: unique systems with unique values. Natural Resources and Environmental Issues XV*. The S. J. and Jessie E. Quinney Natural Resources Research Library, published in conjunction with the Utah State University College of Natural Resources. 269 p.
- Oseguera, L. A., J. Alcocer & G. Vilaclara. 2011. Relative importance of dust inputs and aquatic biological production as sources of lake sediments in an oligotrophic lake in a semi-arid area. *Earth Surface Processes and Landforms* 36: 419-426.
- Oseguera Pérez, L. A., J. Alcocer Durand & E. Y. Villarreal Quintero. 2015. Metabolismo lacustre de un lago tropical profundo: ¿Fuente o sumidero de carbono? *Hidrobiológica* 25: 391-399.
- Ramírez-Olvera, M. A., J. Alcocer, M. Merino & A. Lugo. 2009. Nutrient limitation in a tropical saline lake: a microcosm experiment. *Hydrobiologia* 626: 5-13.
- Ramos-Higuera, E., J. Alcocer, E. Ortega-Mayagoitia & A. Camacho. 2008. Nitrógeno: elemento limitante para el crecimiento fitoplanctónico en un lago oligotrófico tropical. *Hidrobiológica* 18: 105-113.
- Luis A. Oseguera.** Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.

Contacto

Javier Alcocer. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.
jalcocer@unam.mx





El alga dorada

Ma. Guadalupe Oliva Martínez

Gloria Vilaclara

Elizabeth Ortega Mayagoitia

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Bacillariophyta

Clase: Mediophyceae

Orden: Stenophanodiscales

Familia: Stephanodiscaceae

Género: *Cyclotella*

Especie: *Cyclotella alchichicana* (Oliva, Lugo, Alcocer y Cantoral 2006)

Nombre común: Alga dorada o diatomea

Descripción de la especie

Cyclotella alchichicana (Fig. 6.1 A) es un organismo autótrofo (fotosintético) planctónico, es decir, que vive en suspensión en la columna de agua del lago Alchichica (Fig. 6.1 B), que no se ha encontrado hasta la fecha en ningún otro lugar del mundo, por lo que se trata de una especie endémica (exclusiva) del lago. Su ubicación taxonómica, presentada en el recuadro de inicio, se basa en Turland *et al.* (2018) y Guiry (2018). Sus células son solitarias, con forma cilíndrica y, como todas las diatomeas, tienen una cubierta de ópalo (dióxido de sílice, un tipo de vidrio muy ornamentado) biogénico que se llama frústulo, compuesto a su vez por dos mitades (o

valvas), como si se tratara de una cajita sílicea; los diámetros valvares (de la célula vista desde arriba o desde abajo) varían de 35 a 65 μm , con numerosos cloroplastos discoidales. En vista lateral (también llamada conectiva o pleural), los frústulos se observan más o menos altos, desde $1/3$ hasta casi el tamaño del diámetro valvar (Fig. 6.2 B). La ornamentación de las valvas, consistente en perforaciones, presenta dos zonas bien diferenciadas al observarla con un microscopio de luz transmitida: a) una marginal que ocupa aproximadamente la tercera parte del radio, con 8-12 estrías cada 10 μm y con dos espinas marginales dirigidas en dos sentidos, dispuestas cada dos o tres estrías, y b) la zona central con líneas radiales, mucho menos visibles, que

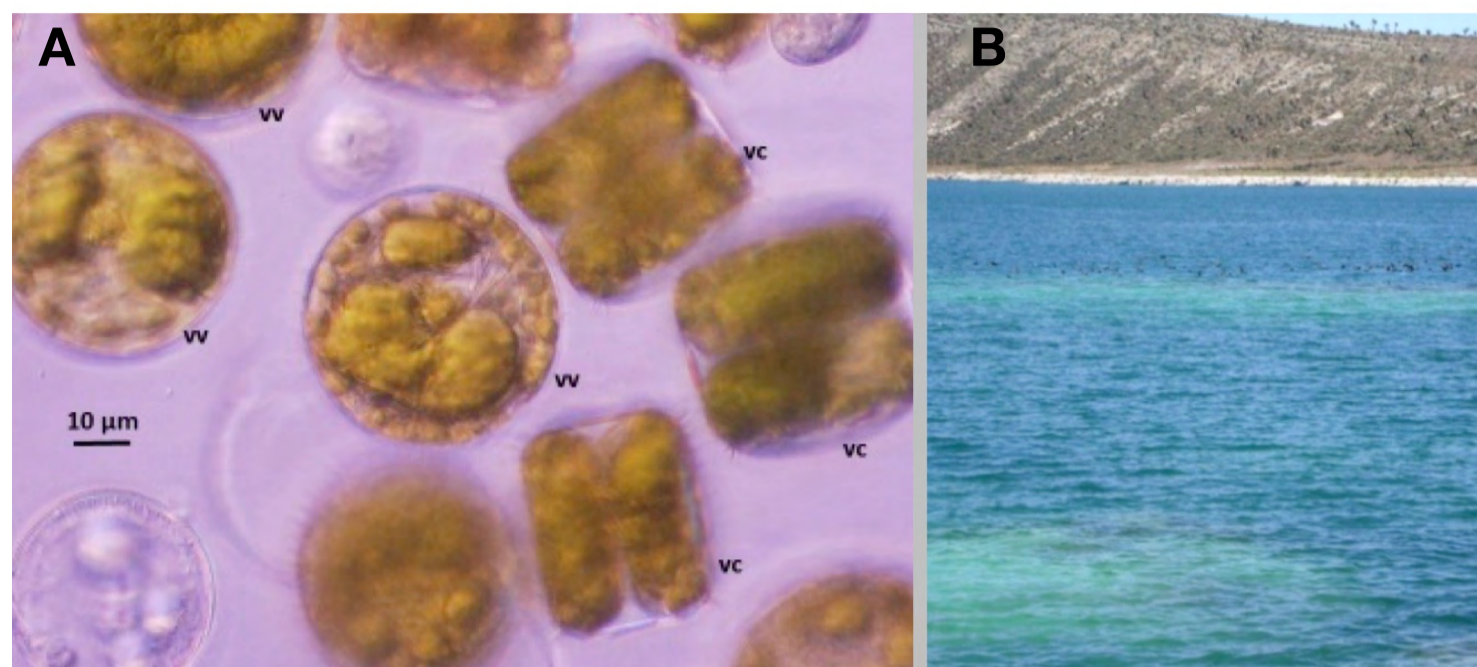


Figura 6.1. A) La diatomea *Cyclotella alchichicana* en vistas valvar (de cara, vv) y conectiva (de lado, vc, se observa cómo se dividen activamente). B) En condiciones de crecimiento acelerado en toda la columna de agua, las aguas del lago Alchichica se ven algo turbias. A) Microscopio Olympus IX70, técnica Nomarski; escala: 10 µm. (Fotografías: A) Gloria Vilaclara; B) Ma. Guadalupe Oliva).

se distribuyen hacia la zona marginal; en esta zona se aprecia un anillo irregular de puntos que se llaman fultopórtulas (es decir, procesos reforzados) centrales (Fig. 6.2 B y D). Con el microscopio electrónico de barrido se distinguen de 6 a 19 fultopórtulas centrales con tres (raramente cuatro) poros satélite, así como la existencia de otros procesos reforzados o fultopórtulas en la región marginal, con densidad variable 1:1 (entre cada estría), 1:2:1 (entre cada 2 estrías, o incluso entre cada 3 estrías, 1:3:1). Adicionalmente presenta otras ornamentaciones, como es la única rimopórtula (llamado también proceso labiado) marginal: se trata de una ranura sin proyección externa, pero que internamente muestra un tallo terminado en dos labios oblicuos hacia el manto (o zona de la valva que se curva hacia la zona lateral, Fig. 6.3, ver pie de figura para detalles).

Particularidades del género *Cyclotella* y de la especie *C. alchichicana*

Cyclotella es un nombre del nivel taxonómico “género” comúnmente encontrado en la literatura de diatomeas. Tradicionalmente es uno de los géneros con mayor diversidad morfológica, taxonómica y ecológica de las diatomeas. De hecho, más de 660 nombres diferentes de especies se han clasificado dentro del género *Cyclotella* (Fourtanier y Kociolek 2011). Incluye especies del Orden Thalassiosirales con un área central distinta a la del margen de la valva (Håkansson 2002, Burić *et al.* 2007). La especie *C. alchichicana* corresponde al género *Cyclotella sensu stricto*, es decir, tiene una rimopórtula en el anillo de las fultopórtulas marginales (Nakov *et al.* 2015).

Cyclotella alchichicana fue descrita exclusivamente para Alchichica. Es morfológicamente similar a *C. quillensis* (Battarbee *et al.* 1984, Håkansson 2002), pero difiere de esta especie por su particular arreglo en las fultopórtulas marginales y por la abertura externa de la rimopórtula, una ranura alargada que carece de proyección externa en el manto de la valva (Oliva *et al.* 2006).

Hábitat / Distribución en el lago

Las especies del género *Cyclotella* son abundantes en el plancton y en los sedimentos de lagos y ríos de aguas dulces en todo el mundo; a veces se encuentran en lagos salinos y en ambientes marinos costeros poco profundos (Flower *et al.* 1990). En particular, para ambientes salinos donde se

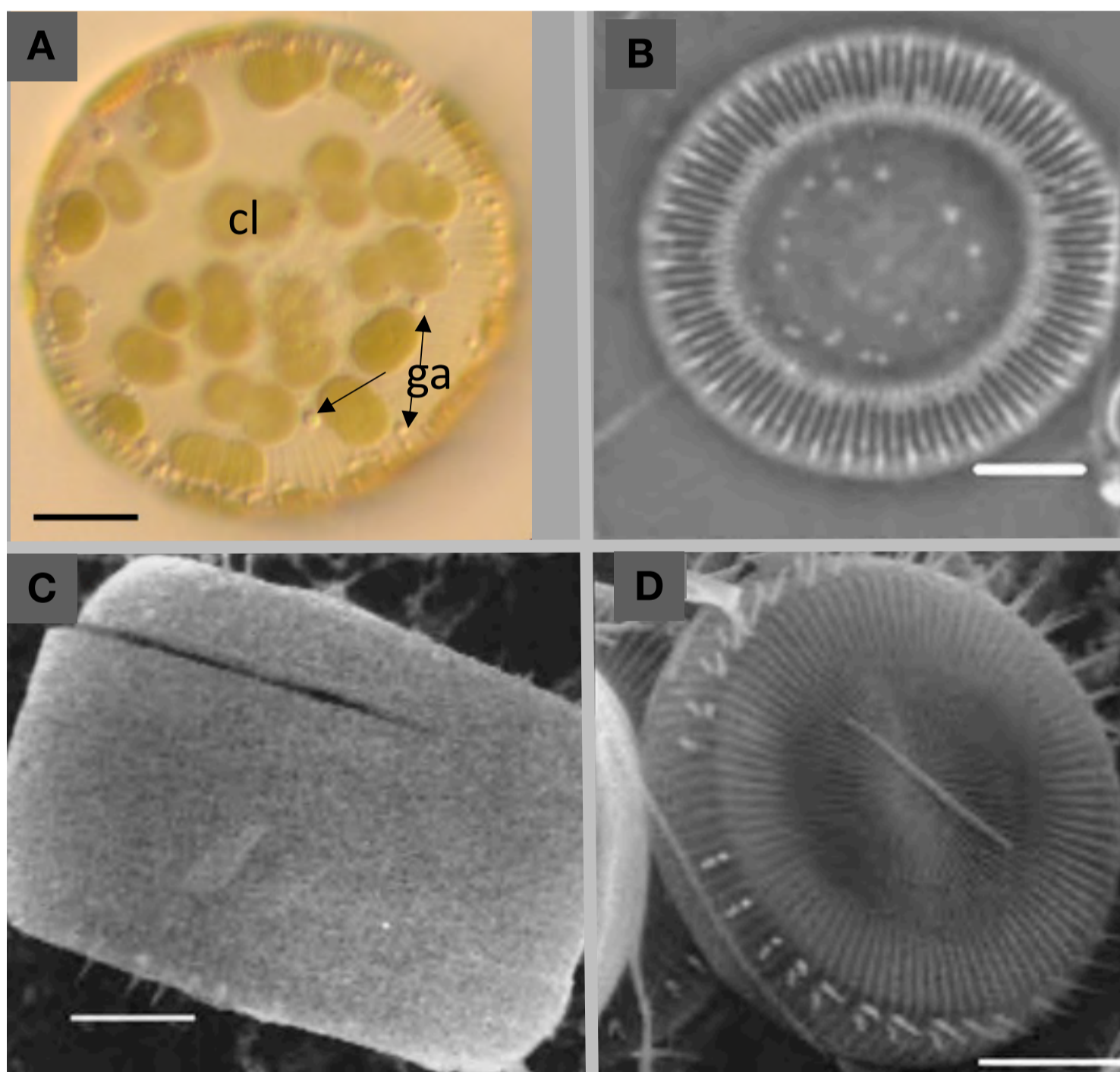


Figura 6.2. *Cyclotella alchichicana*. A) Vista valvar externa, con cloroplastos (cl) y algunas gotas pequeñas de aceite (ga, material de reserva). B) Vista valvar interna. C) Vista lateral (conectiva). D) Vista valvar externa que muestra el área marginal y central y las espinas (escalas: 10 μ m). (Microfotografías: A) Gloria Vilaclara, microscopio Zeiss Axio Scope. A1, técnica Nomarski. Ma. Guadalupe Oliva: B) microscopio Nikon Lobophot-2; C) y D) microscopio electrónico de barrido JEOL JSM-5200).

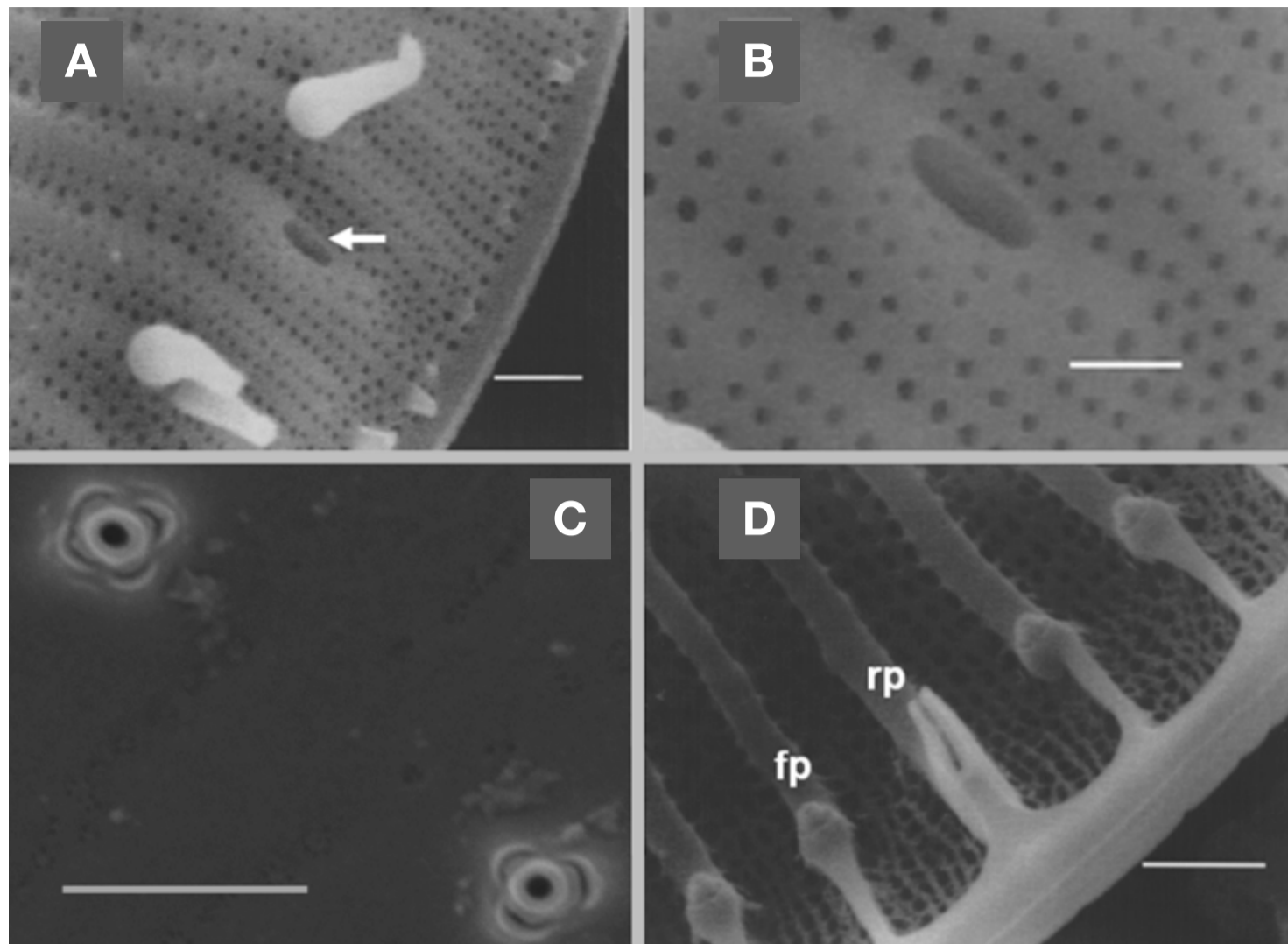


Figura 6.3. Microfotografías con microscopio electrónico de barrido de *Cyclotella alchichicana*. A) y B) Detalles del área marginal externa de la rimopórtula (marcado con flecha, B) acercamiento). C) Vista interna de la valva, mostrando dos fultopórtulas del anillo central, con 3 (abajo) y 4 (arriba, menos frecuente) poros satélite. D) Detalle de la rimopórtula (rp) y fultopórtulas marginales (fp). Escala = 1 μm (A), C) y D)-, 0.5 μm (B)-. (Microfotografías: A), B) y D) Ma. Guadalupe Oliva, JEOL JSM-5200. C) Gloria Vilaclara, Cambridge-Leica 360).

reconoce la abundancia de diatomeas (Saros y Fritz 2000) tan solo se han encontrado 12 especies de *Cyclotella* (Prasad *et al.* 1990, Kiss *et al.* 2012), a las que se suma *C. alchichicana* como especie microendémica.

C. alchichicana se halla a lo largo de la columna de agua del lago Alchichica, desde la superficie y hasta el fondo, que en este caso es de poco más de 60 m de profundidad. Es muy abundante durante el periodo de mezcla (finales de diciembre-enero a principios de abril) del lago, cuando se distribuye a lo largo de la columna de agua,

desde la superficie hasta el fondo. Durante el periodo de estratificación, *C. alchichicana* se presenta, en densidades variables, asociada principalmente a la zona intermedia de la columna de agua llamada metalimnion, donde se observa un fuerte gradiente de temperatura (termoclina) y de oxígeno (oxiclina), que forma un máximo profundo de clorofila (Alcocer *et al.* 2000, Oliva *et al.* 2001, 2006 y Ortega-Mayagoitia *et al.* 2011, 2018). Lo anterior apunta a que se trata de una especie con crecimiento tanto en condiciones bien iluminadas en superficie (en

invierno, cuando la radiación solar no es tan intensa), como de penumbra en la zona del metalimnion (Fig. 6.4).

El intervalo de condiciones ambientales para *C. alchichicana* varía: entre 13.3 y 14.5 mS cm⁻¹ de conductividad eléctrica (o salinidad), pH de 8.8-9.1, temperatura 14.5-21.0°C; el lago Alchichica es oligotrófico, con bajas concentraciones de nutrientes (N-NH₃ entre no detectables -n.d.- y 0.98 mg L⁻¹, N-NO₂⁻ n.d.- 0.007 mg L⁻¹, N-NO₃⁻ 0.1-1.0 mg L⁻¹, P-PO₄⁻³ n.d.-0.54 mg L⁻¹) (Oliva *et al.* 2001, Alcocer y Lugo 2003, Oliva *et al.* 2006). Es interesante observar que pueden encontrarse células con apariencia todavía vital y en división en zonas del metalimnion e incluso del hipolimnion (la capa por debajo del metalimnion y hasta el fondo) bajo condiciones hipóxicas (bajo contenido de oxígeno disuelto) o incluso anoxia (ausencia de oxígeno disuelto), aunque es probable que no

puedan sobrevivir durante lapsos prolongados en condiciones de anoxia y en total oscuridad.

Por otro lado, la sílice disuelta en el agua (Si) es fundamental para el crecimiento de las diatomeas, pues la emplean para construir sus cubiertas de ópalo biogénico (frústulos). A este respecto, llama la atención que el lago Alchichica contenga cantidades mínimas o indetectables de Si (usualmente <1 mg L⁻¹ Si-SiO₂), a pesar de que el agua subterránea que alimenta al lago está en equilibrio con sustratos geológicos volcánicos ricos en sílice. Al comparar las condiciones de Alchichica con el vecino lago Atexcac, con química similar del agua excepto porque contiene unas 40 veces más de Si (Armienta *et al.* 2008), una diferencia principal estriba en que *C. alchichicana* microendémica de Alchichica y, por ende, no se encuentra en Atexcac es una diatomea

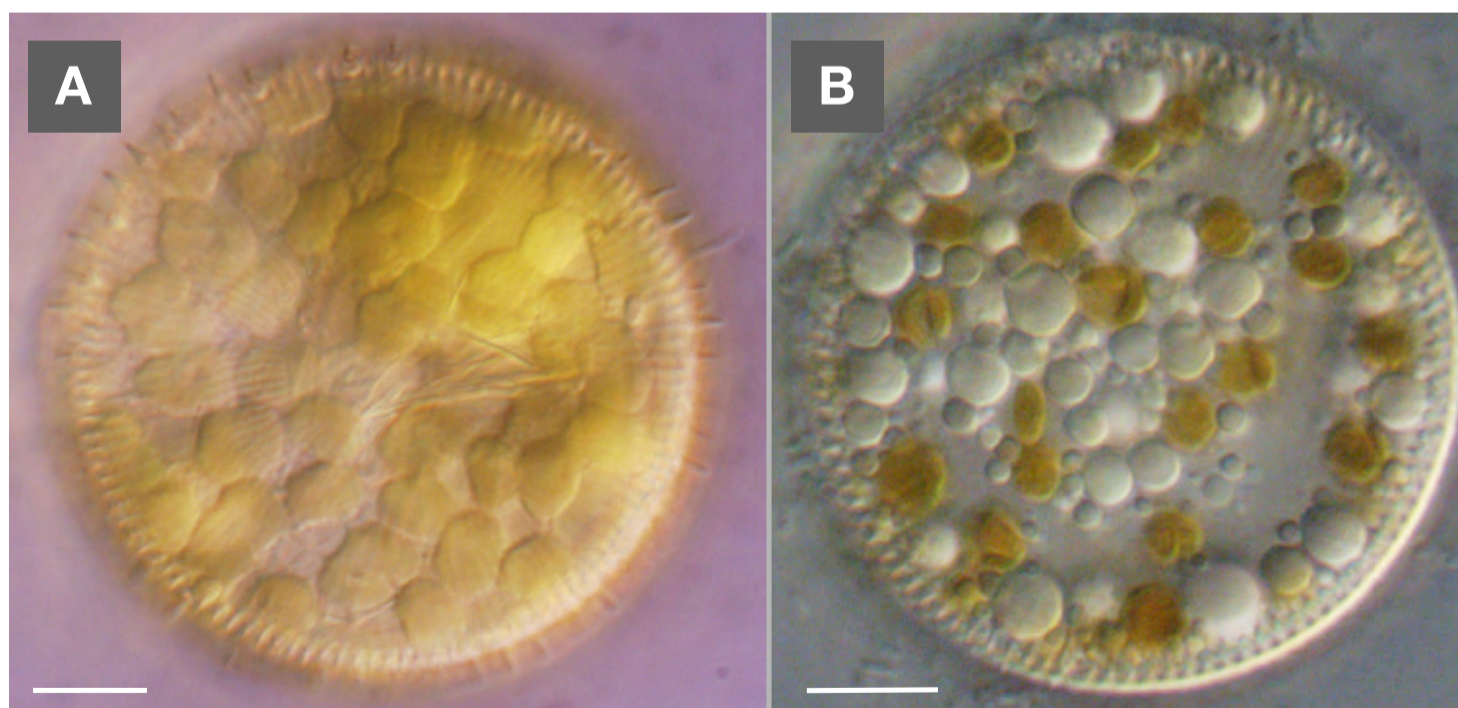


Figura 6.4. A) Célula de *Cyclotella alchichicana* en buenas condiciones, con numerosos cloroplastos. B) Célula en condiciones ambientales más precarias, con un menor número de cloroplastos y numerosas gotas de aceite, o material de reserva. (Microfotografías: Gloria Vilaclara tomadas con un invertoscopio Olympus IX 70, técnica Nomarski; escala: 10 µm).

considerada “robusta” tanto por su tamaño como por sus gruesas y rígidas cubiertas silíceas; estas características la convierten en una especie que impacta el ciclo de la sílice en el ambiente planctónico donde vive, actúan como instrumento de absorción y sumidero de Si, pues al morir las células, los frústulos se depositan en el fondo, lo que induce a que la sílice se quede mayormente atrapada en los sedimentos en Alchichica.

El estudio de las diatomeas puede ser utilizado para evaluar los efectos de la variabilidad climática en los ecosistemas lacustres, si se comprenden bien las relaciones ecológicas entre la estructura de la comunidad de diatomeas y los parámetros ambientales. *Cyclotella* conforma un grupo importante de diatomeas que, con frecuencia, son miembros dominantes de las comunidades de fitoplancton en lagos de baja a moderada productividad. Sus abundancias relativas han fluctuado significativamente en los registros paleolimnológicos que abarcan más de un siglo en los lagos árticos, alpinos, boreales y templados (Saros y Anderson 2015). *C. alchichicana* podría ser considerada una indicadora de cambio climático a relativamente corto plazo, dado que el calentamiento global acortaría el lapso de mezcla de la columna de agua, mientras alarga la fase de estratificación anual; lo anterior implica que *C. alchichicana* quedaría confinada durante más tiempo en la zona del máximo profundo de clorofila del metalimnion, donde sus densidades pueden fluctuar de menores a mayores (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2011), en

comparación con el periodo de mezcla (cuando genera los más importantes florecimientos, es decir, altas densidades celulares), previsiblemente abreviado por el calentamiento global.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido patrocinado por los proyectos PAPIIT IN225517, IN215512 e IN221009, así como CONACYT-103332.

Referencias

- Alcocer, J. & A. Lugo. 2003. Effects of El Niño on the dynamics of Lake Alchichica, central Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 523-528.
- Alcocer, J., A. Lugo, G. Vilaclara, M.R. Sánchez & E. Escobar. 2000. Water column stratification and its implications in a tropical, warm-monomictic, saline lake: Alchichica, Puebla, Mexico. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 27: 3166-3169.
- Armienta, M. A., G. Vilaclara, S. De la Cruz-Reyna, S. Ramos & F. Arcega-Cabrera. 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178: 249-258.
- Battarbee, R. W., C. M. Keister & J. P. Bradbury. 1984. The frustular morphology and taxonomic relationships of *Cyclotella quillensis* Bailey. Pp. 173-184. En D. Mann (Ed.). *Proceedings of the 7th International Diatom Symposium*, Philadelphia.
- Burić, Z., K. T. Kiss, É. Ács, D. Viličić, K. C. Mihalić & M. Carić. 2007. The occurrence and ecology of the centric diatom *Cyclotella choctawhatcheeana* Prasad in a

- Croatian estuary. *Nova Hedwigia* 84: 135-153.
- Flower, R. J., F. Gasse & H. Håkansson. 1990. A new species of *Cyclotella*, *C. azigzensis* sp. nov., described from modern material collected from upland lakes in Morocco. *Diatom Research* 5: 253-260.
- Fourtanier, E. & J. P. Kociolek. 2011. Catalogue of Diatom Names, California Academy of Sciences, Online Version. Disponible en: <http://research.calacademy.org/research/diatoms/names/index.asp>
- Guiry, W., in M. D. Guiry & G. M. Guiry. 2018. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; consultada el 22 de octubre de 2018.
- Håkansson, H. 2002. A compilation and evaluation of species in the general *Stephanodiscus*, *Cyclostephanos* and *Cyclotella* with a new genus in the family Stephanodiscaceae. *Diatom Research* 17: 1-139.
- Kiss, K. T., R. Klee, L. Ector & É. Ács. 2012. Centric diatoms of large rivers and tributaries in Hungary: morphology and biogeographic distribution. *Acta Botanica Croatica* 71: 311-363.
- Nakov, T., W. X. Guillory, M. L. Julius, E. C. Theriot & A. J. Alverson. 2015. Towards a phylogenetic classification of species belonging to the diatom genus *Cyclotella* (Bacillariophyceae): Transfer of species formerly placed in *Puncticulata*, *Handmannia*, *Pliocaenicus* and *Cyclotella* to the genus *Lindavia*. *Phytotaxa* 217: 249-264.
- Oliva, M. G., A. Lugo, J. Alcocer, L. Peralta & M. R. Sánchez. 2001. Phytoplankton dynamics in a deep, tropical, hyposaline lake. *Hydrobiologia* 466: 299-306.
- Oliva, M. G., A. Lugo, J. Alcocer & E. A. Cantoral-Uriza. 2006. *Cyclotella alchichicana* sp. nov. from a saline Mexican lake. *Diatom Research* 21: 81-89.
- Ortega-Mayagoitia, E., J. Ciros-Pérez & M. Sánchez-Martínez. 2011. A story of famine in the pelagic realm: temporal and spatial patterns of food limitation in rotifers from an oligotrophic tropical lake. *Journal of Plankton Research* 33: 1574-1585.
- Ortega-Mayagoitia, E., O. Hernández-Martínez & J. Ciros-Pérez. 2018. Phenotypic plasticity of life-history traits of a calanoid copepod in a tropical lake: is the magnitude of thermal plasticity related to thermal variability? *PLoS ONE* 13: e0196496
- Prasad, A. K. S. K., J. A. Nienow & R. J. Livingston. 1990. The genus *Cyclotella* (Bacillariophyta) in Choctawhatchee Bay, Florida, with special reference to *C. striata* and *C. choctawhatcheeana* sp. nov. *Phycologia* 29: 418-436.
- Saros, J. E. & N. J. Anderson. 2015. The ecology of the planktonic diatom *Cyclotella* and its implications for global environmental change studies. *Biological Reviews Cambridge Philosophical Society* 90: 522-541.
- Saros, J. E. & S. C. Fritz. 2000. Changes in the growth rates of saline-lake diatoms in response to variation in salinity, brine type and nitrogen form. *Journal of Plankton Research* 22: 1071-1083.
- Turland, N. J., J. H. Wiersema, F. R. Barrie, W. Greuter, D. L. Hawksworth, P. S. Herendeen, S. Knapp, W. H. Kusber, D. Z. Li, K. Marhold, T. W. May, J. McNeill, A.M. Monro, J. Prado, M. J. Price & G. F. Smith (Eds.). 2018. *International Code of Nomenclature for algae, fungi, and plants (Shenzhen Code) adopted by the Nineteenth International Botanical Congress Shenzhen, China, July 2017*. Regnum Vegetabile 159. Glashütten: Koeltz Botanical Books.

Contacto

Ma. Guadalupe Oliva Martínez. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Esta-

do de México, México.
oliva.guad@gmail.com

Gloria Vilaclara. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.

Elizabeth Ortega Mayagoitia. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.





La lama

Gloria Vilaclara

Ma. Guadalupe Oliva Martínez

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Cyanobacteria
Clase: Cyanophyceae
Orden: Nostocales
Familia: Aphanizomenonaceae
Género: *Nodularia*
Especie: *Nodularia* aff. *spumigena* (Mertens ex Bornet y Flahault 1886)
Nombre común: Lama

Descripción de la especie

Nodularia aff. *spumigena* es una microalga planctónica, productora primaria en la zona abierta (columna de agua) del lago Alchichica, que alcanza a observarse a simple vista cuando crece desmesuradamente una vez al año. Los habitantes de la zona la reconocen entonces con el nombre de “lama”, porque aparece como masas flotantes parecidas a un cieno verdoso a amarillento (Fig. 7.1).

La ubicación taxonómica en el recuadro de inicio se basa en los autores Komárek *et al.* (2014) y Guiry (2018). Considerando su descripción formal, se trata de la especie representativa del grupo de las cianobacterias nostocales en Alchichica. Exhibe filamentos usualmente largos y rectos, en

algunos casos ligeramente curvados, o bien con algún punto de inflexión (previo a una rotura, producto de la muerte y degradación de células vegetativas intermedias) que modifica su dirección (Figs. 7.2 y 7.3 B). Los filamentos tienen una sola hilera de células (o tricoma), es decir, son uniseriados y carecen de ramificaciones; son solitarios cuando el desarrollo de la especie es menor, o se presentan como crecimientos masivos (florecimientos), vistos como natas más o menos densas en la superficie del agua (Fig. 7.1). El diámetro de los filamentos varía de 9.0 a 13.5 μm y su longitud oscila entre 40 μm (los más cortos se encuentran cuando disminuye mucho su densidad y quedan sólo fragmentos escasos) hasta unos pocos centímetros, lo que facilita su característica

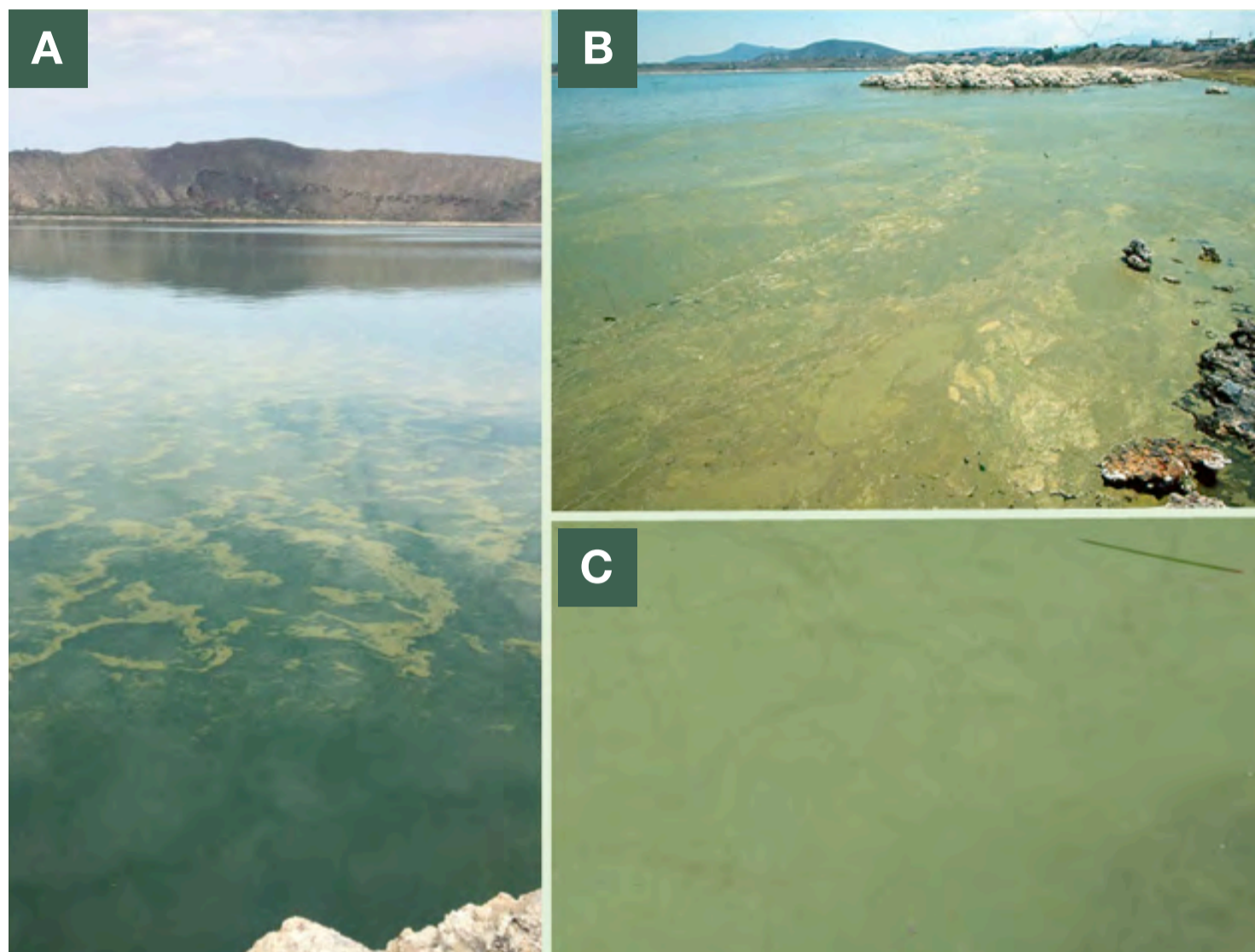


Figura 7.1. A) Fotografía de la “lama”, nombre que dan los habitantes de la zona al florecimiento anual de *Nodularia* aff. *spumigena*. B) y C) Florecimientos más intensos; en C) acercamiento a la “lama”. (Fotografías: A) Luis Oseguera; B) y C) Javier Alcocer).

detección a simple vista en la fase de florecimiento.

El filamento está conformado por el tricoma y la vaina mucilaginoso. El tricoma es cilíndrico, compuesto de una hilera de células densamente empaquetadas y no se adelgaza en las partes terminales. La vaina es delgada, incolora y transparente; a pesar de ello, alcanza a observarse con el microscopio (Fig. 7.3 A y B).

Las células vegetativas son fotótrofas, pues contienen clorofila y otros pigmentos que les permiten llevar a cabo el proceso de fotosíntesis (proceso metabólico autotrófi-

co de formación de nueva materia orgánica mediante nutrientes inorgánicos y luz). Su forma es discoidal, son más anchas que altas (diámetro o anchura 7.0 a 12.0 μm , altura o longitud 2.7 a 3.6 μm , Oliva *et al.* 2009) y presentan constricciones en la división entre células o septos. Contienen vesículas de gas denominadas aerotopos que favorecen la flotación de los filamentos cuando se hinchan. Su color es verdoso, con tonalidades desde algo más oscuras hasta amarillentas (Fig. 7.3 A y B).

Los tricomas son metaméricos, es decir, pueden desarrollar un tipo especial de

células intercaladas a intervalos regulares entre las células vegetativas (Komárek y Johansen 2015), los heterocitos (Fig. 6.3 A y C). Su forma es similar a la de las células vegetativas, excepto porque tienen una pared celular más gruesa y contenido menos denso, así como por su tamaño (anchura 6.1 a 10.9 μm y longitud 4.5 a 6.4 μm , Oliva *et al.* 2009). Por las razones que se explican en detalle más adelante, la formación de heterocitos en *N. aff. spumigena* se relaciona con una baja proporción de nitrógeno inorgánico *versus* fósforo inorgánico en el agua, pudiendo formar un heterocito cada 12 a 16 células vegetativas en el pico del

floreCIMIENTO (Oliva *et al.* 2009); el número de heterocitos disminuye cuando vuelve a incrementar el nitrógeno en el medio.

Particularidades de *Nodularia* *aff. spumigena* en Alchichica

La *Nodularia* de Alchichica se considera cercana a la especie *Nodularia spumigena* originalmente descrita en el Mar Báltico, de ahí el uso de *aff.* (abreviatura del latín *affine*, afín) para la de Alchichica. Las características morfológicas generales coinciden en ambas especies, excepto por la presencia común de filamentos helicoidales en *N.*

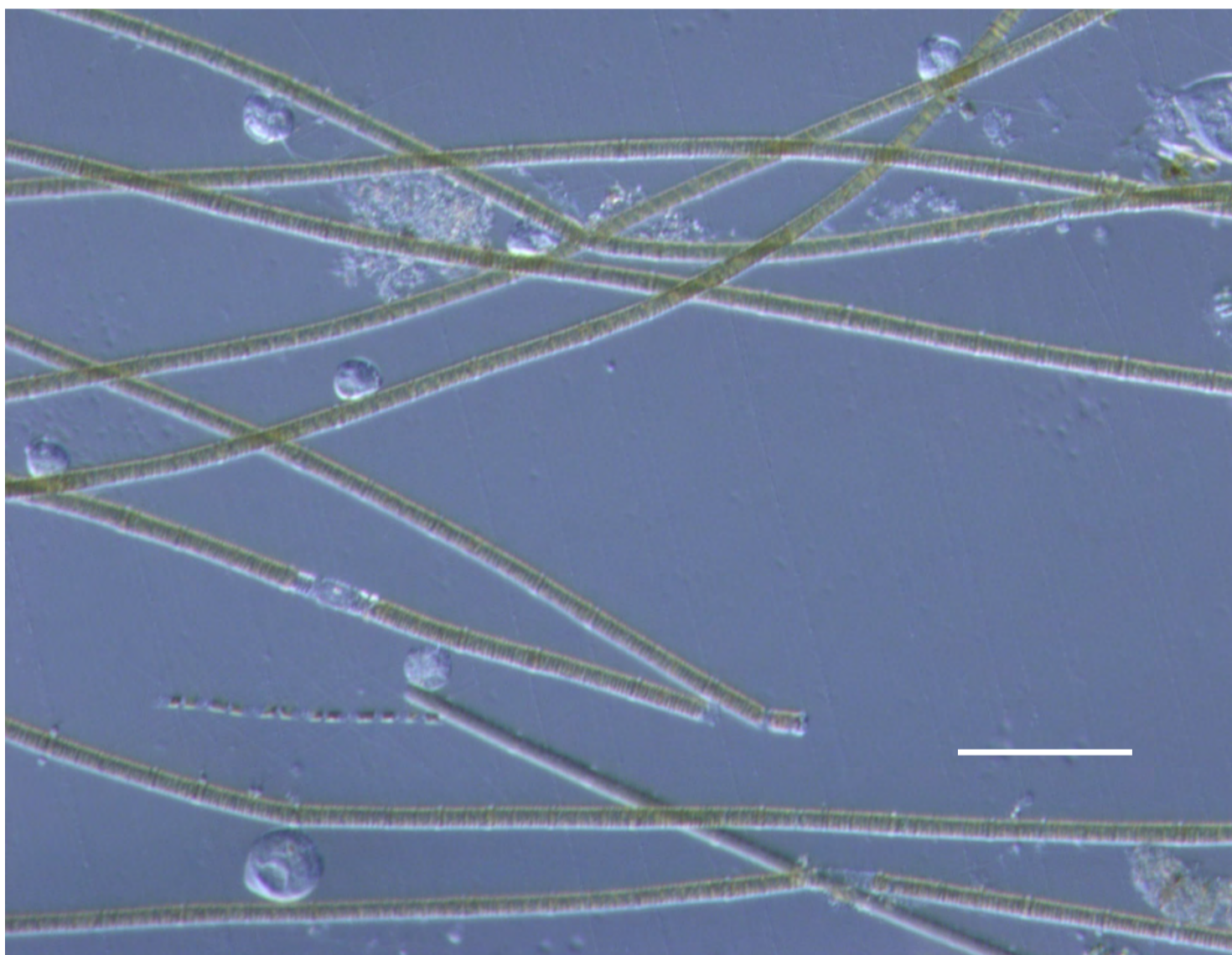


Figura 7.2. Microfotografía *in vivo* de *Nodularia* *aff. spumigena*, con presencia de protozoos ciliados epibiontes encima de sus filamentos (fotomicroscopio Zeiss Axio Scope. A1, técnica Nomarsky, escala: 100 μm . Microfotografía: Gloria Vilaclara).

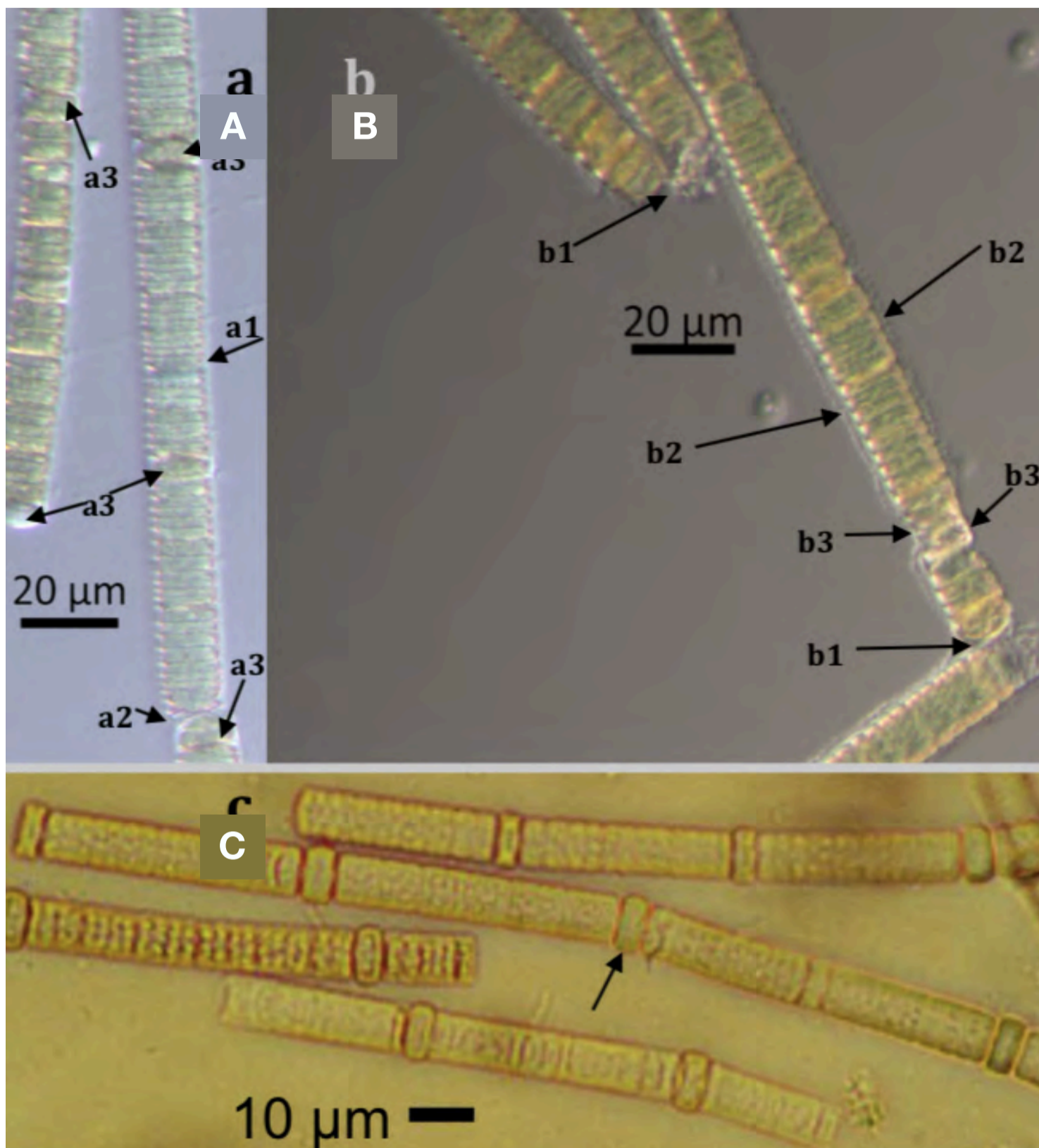


Figura 7.3. Microfotografías de filamentos de *Nodularia* aff. *spumigena*. A) Muestra la tenue vaina del filamento (a1), la distribución de las células en el tricoma y zonas debilitadas (a2) que se constituyen en zonas de rotura de los filamentos, frecuentemente en puntos de unión entre células vegetativas y especiales (usualmente heterocitos, varios de ellos en formación en la foto, a3). B) Tricomas sin formación de heterocitos, con roturas en las zonas debilitadas (b1), y la vaina mucilaginosa claramente delimitada (b2), excepto en las zonas donde se degradan las células vegetativas (b3), previo a su rotura. C) Filamentos con heterocitos (diversas células diferenciadas como la marcada con flecha). (A y B): *in vivo*, Zeiss Axio Scope. A1, técnica Nomarski; C): Nikon Labophot-2. Microfotografías: A) y B) Gloria Vilaclara; C) Ma. Guadalupe Oliva).

spumigena del Báltico, nunca observados en Alchichica, y porque viven en ambientes parcialmente similares, por un lado, aunque claramente diferentes en otros aspectos.

Los parámetros más parecidos son la cantidad de sales disueltas y las temperaturas óptimas del agua: en el Báltico, la salinidad tiene una concentración promedio de

7.5 g kg⁻¹ (Lappäranta y Myrberg 2009), con variaciones amplias entre 3 y 18 g kg⁻¹ (Mazur-Marzec *et al.* 2005, Teikari *et al.* 2018), en comparación con unos 8.5 g kg⁻¹ de promedio, relativamente constantes, en Alchichica. En cuanto a las temperaturas, en el Báltico se reportan crecimientos adecuados a óptimos de la especie en temperaturas entre 20° y 25°C (Lehtimäki *et al.* 1997, en O'Neill *et al.* 2012), encontrándose los florecimientos de Alchichica dentro del intervalo inferior (20°-22°C). Lo radicalmente diferente es la alcalinidad: baja en el Báltico (Teikari *et al.* 2018), considerablemente elevada en Alchichica, al grado que sus aguas se definen como alcalino-sódicas (Vilaclara *et al.* 1993, Armienta *et al.* 2008).

Asociación de *Nodularia* aff. *spumigena* con otras especies en Alchichica

En los florecimientos de *Nodularia* del lago Alchichica es frecuente encontrar bacterias y otros organismos acuáticos (como ciliados y flagelados) adheridos encima de sus filamentos; se trata entonces de asociaciones con lo que se conoce como especies epibiontes, todas ellas heterótrofas (es decir, que dependen de la absorción/ingesta de materia orgánica): tanto bacterias en la vaina mucilagionosa (Fig. 7.4 A y B), como epizooides, es decir, ciliados peritricos (vorticélicos, Figs. 7.2, 7.5 A y B) y coanoflagelados tipo *Monosiga* (Thomsen y Buck 1991, Fig. 7.4 B). Estas asociacio-

nes en parte tienen su explicación en que la fotosíntesis y la presencia de una vaina mucilagionosa en especies como *Nodularia* generan la producción de polisacáridos (azúcares complejos) de utilidad para bacterias heterótrofas (Fuks *et al.* 2005); asimismo, se conoce desde hace tiempo que los organismos filtradores pueden generar movimientos natatorios al batir sus cilios o flagelos, pero cuando se encuentran anclados a una superficie, las corrientes formadas funcionan mejor para su alimentación (Canter *et al.* 1992); ambos aspectos probablemente se combinan y explican la prevalencia de estos epibiontes en Alchichica. Dicha asociación también llega a verse con otras especies del fitoplancton, aunque se observa más extendida en *Nodularia* cuando entra en fase de florecimiento, posiblemente por su elevado número y capacidad de flotación, más efectiva dada la presencia de aerotopos llenos de gas en condiciones soleadas y de viento en calma.

Hábitat/Distribución en el lago

Nodularia aff. *spumigena* es una especie autótrofa fotosintética que vive en suspensión dentro de la columna de agua, perteneciendo por ello a la comunidad fitoplanctónica del lago Alchichica.

Como todos los productores primarios fotosintéticos, necesita nutrientes inorgánicos para crecer, siendo nitrógeno (Ni) y fósforo (Pi) los más importantes. Sin embargo y a diferencia de los demás productores primarios planctónicos de Alchichica (como

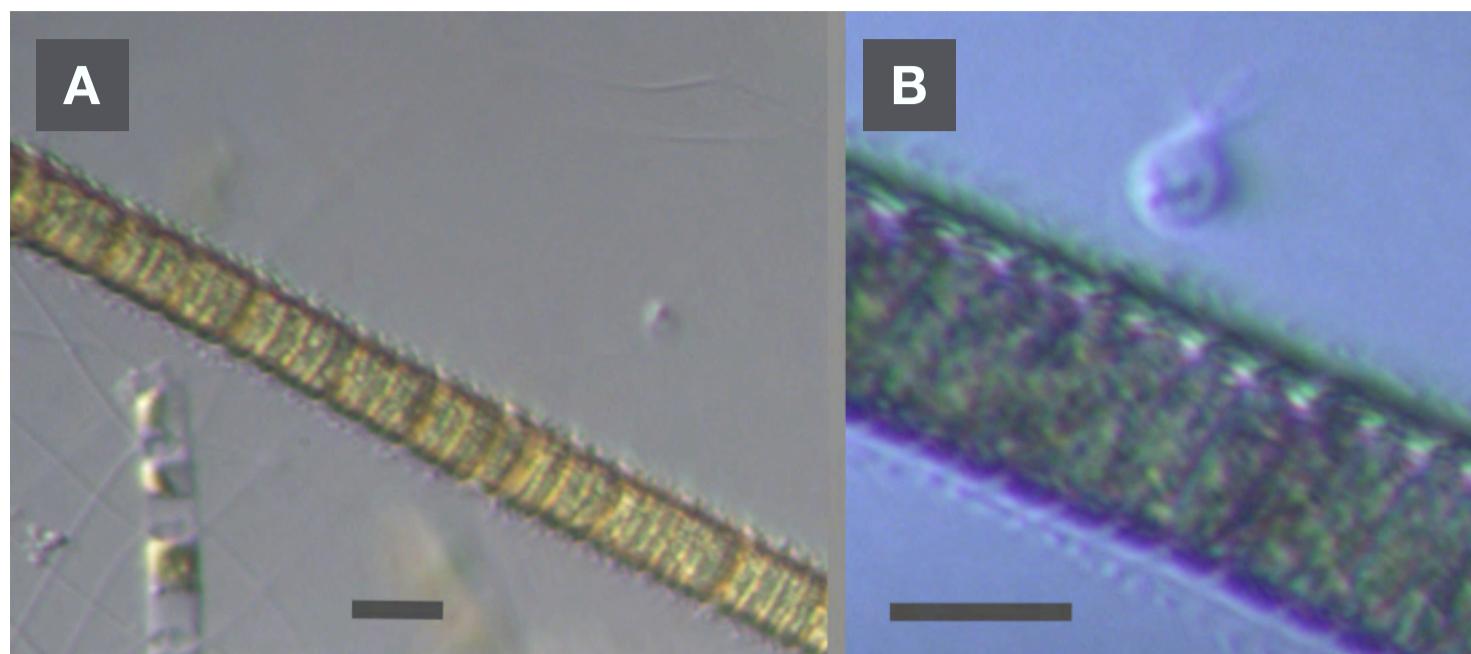


Figura 7.4. Microfotografías in vivo de epibiontes asociados con *Nodularia* aff. *spumigena*. A) Bacterias epibiontes en la vaina mucilaginosa; se observa en la parte inferior otra especie planctónica, la diatomea *Chaetoceros elmorei*. B) Bacterias en vaina y coanoflagelada (tipo *Monosiga*). (Zeiss Axio Scope.A1, técnica Nomarski, escala: 10 μ m. Microfotografías: Gloria Vilaclara).

Cyclotella alchichicana), *Nodularia* es diazotrófica, es decir, tiene la capacidad de captar N_2 atmosférico (disuelto en el agua) para generar nueva biomasa mediante la producción de células especiales o heterocitos. Esto ocurre usualmente cuando escasea el Ni, pero todavía hay Pi en la capa iluminada de la columna de agua; tal situación otorga una clara ventaja competitiva a *Nodularia* y explica su florecimiento anual, en manera similar a los florecimientos de otras cianobacterias fijadoras de nitrógeno (O’Neil *et al.* 2012). Las condiciones favorecedoras del florecimiento se observan en algún momento entre los meses de abril y junio, cuando el lago inicia su estratificación térmica y los déficits de Ni, relativos al Pi, se detectan en la capa superior iluminada de la columna de agua (epilimnion, considerada la capa de mezcla en estratificación). Es importante este desarrollo masivo para un lago tan

poco productivo (oligotrófico) como Alchichica, pues se trata de una fuente de materia orgánica (medida como carbono orgánico particulado y disuelto) significativa cuando empiezan a disminuir los nutrientes en el epilimnion tras la mezcla invernal total. Finalmente, el florecimiento decae hasta desaparecer cuando el Pi también escasea, a más tardar en el mes de junio (Alcocer *et al.* 2014).

La intensidad y duración de los florecimientos de *N. aff. spumigena* son variables de año en año, pero en aguas abiertas sólo se observa la “lama” bajo condiciones de elevada radiación solar y con el agua superficial en calma por falta de viento; en estas circunstancias, los aerotopos se encuentran llenos de gas y mantienen la biomasa de *Nodularia* flotando cerca de la superficie, haciéndola muy notoria (Fig. 7.1 A); tal situación cambia drásticamente en

el transcurso del día, porque cuando el viento alcanza una intensidad media a fuerte alrededor del mediodía, los filamentos se dispersan en el epilimnion. Esto es así porque la energía mecánica (turbulencia) transmitida por el viento al agua, genera el colapso de los aerotopos celulares por presión, por lo que *Nodularia* pierde flotabilidad y se facilita la distribución aleatoria de sus filamentos en la capa de mezcla o epilimnion; entonces y de forma temporal (mientras sopla el viento diurno), ya no se forma la “lama” en superficie, aunque el agua continúa viéndose turbia.

Es relevante mencionar que durante el florecimiento de *Nodularia*, los lugareños perciben y destacan la drástica variación del aspecto del lago Alchichica, por su

pérdida de transparencia y cambio del color azul a verde-amarillento, asociando la aparición de la “lama” a condiciones de “enfermedad” del lago.

Otro aspecto importante es que *Nodularia spumigena* puede formar toxinas (nodularinas) que afectan el hígado (hepatotoxinas, Bonoto da Silveira *et al.* 2017); se han detectado indicios de toxinas similares en Alchichica relacionadas con el florecimiento de *N. aff. spumigena* (Rocío Fernández y Luis Oseguera, com. pers.). Si se confirma su producción por parte de la *Nodularia* de Alchichica, entonces dicha “enfermedad” podría generar impactos mayores a los ya mencionados, en caso de bioacumularse las hepatotoxinas en las redes tróficas (Xie *et al.* 2005, Larson *et al.* 2014).

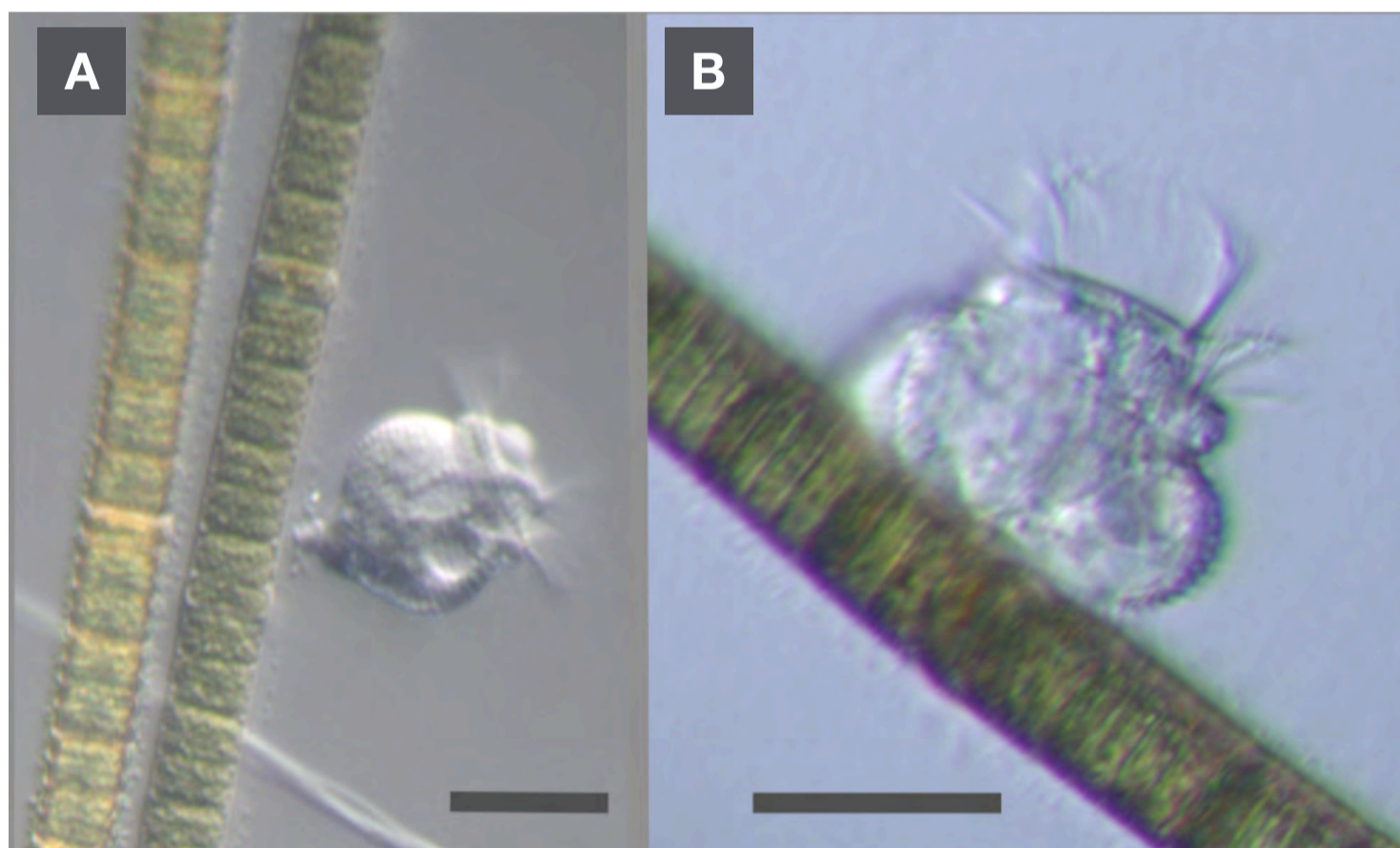


Figura 7.5. Microfotografías in vivo de epibiontes ciliados peritricos asociados con *Nodularia* aff. *spumigena*. A) Vorticélido sésil sobre filamento de *Nodularia*; por debajo se observa el pedúnculo alargado de otro vorticélido. B) Acercamiento a vorticélido sésil epibionte. (Zeiss Axio Scope. A1, técnica Nomarski, escala: 20 μ m. Microfotografías: Gloria Vilaclara).

En conclusión, *Nodularia* aff. *spumigena* es una especie ecológicamente importante para el lago Alchichica y, adicionalmente, podría llegar a reconocerse como nueva especie para la zona, que incluye el cercano lago Atexcac, donde también se desarrolla *Nodularia*, pues su composición fisicoquímica y biológica es cercana a la de Alchichica (Macek *et al.* 1994, Tavera y Komárek 1996).

Agradecimientos

Este trabajo ha sido patrocinado por los proyectos PAPIIT IN225517, IN15512 e IN221009, así como CONACYT-103332. Martha Gaytán Herrera apoyó con la clasificación taxonómica actualizada de las cianobacterias.

Referencias

- Alcocer J., A. Guzmán-Arias, L. Oseguera y E. Escobar. 2014. Dinámica del carbono orgánico disuelto y particulado asociados al florecimiento de *Nodularia spumigena* en un lago tropical oligotrófico. En F. Paz & J. Wong (Eds.), *Estado Actual del Conocimiento del Ciclo del Carbono y sus Interacciones en México: Síntesis a 2014*. Serie Síntesis Nacionales. Programa Mexicano del Carbono en colaboración con el Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, Unidad Mérida, y el centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco. Texcoco, Estado de México.
- Armienta M. A., G. Vilaclara, S. De la Cruz-Reyna, S. Ramos & F. Arcega-Cabrera. 2008. Water chemistry of lakes related to active and inactive Mexican volcanoes. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 178: 249-258.
- Bonoto da Silveira A., W. Wasielesky, A. P. Dini Andreote, M. F. Fiore & C. Odebrecht. 2017 Morphology, phylogeny, growth rate and nodularin production of *Nodularia spumigena* from Brazil. *Marine Biology Research* 13: 1095-1107.
- Canter H. M., A. E. Walsby, R. Kinsman & B. W. Ibelings. 1992. The effect of attached vortellids on the buoyancy of the colonial cyanobacterium *Anabaena lemmermannii*. *British Phycological Journal* 27: 65-74.
- Fuks D., J. Radić, T. Radić, M. Najdek, M. Blazina, D. Degobbi & N. Smolaka. 2005. Relationships between heterotrophic bacteria and cyanobacteria in the northern Adriatic in relation to the mucilage phenomenon. *Science of Total Environment* 353: 178-88.
- Guiry M. D., in M. D. Guiry & G. M. Guiry 2018. AlgaeBase. World-wide electronic publication, National University of Ireland, Galway. <http://www.algaebase.org>; consultado el 05 de junio de 2018.
- Komárek J., J. Kaštovský, J. Mareš & J. R. Johansen 2014. Taxonomic classification of cyanoprokaryotes (cyanobacterial genera), using a polyphasic approach. *Preslia* 86: 295-335.
- Komárek J. & J. R. Johansen. 2015. Filamentous Cyanobacteria. En J. D. Wehr, R. G. Sheath & J.P. Kociolek (Eds.): *Freshwater Algae of North America: Ecology and Classification*, 2nd. Ed., Academic Press.
- Lappäranta M. & K. Myrberg. 2009. Physical Oceanography of the Baltic Sea. Springer-Praxis, Oxford, 400 pp.
- Larson D., G. Ahlgren & E. Willén. 2014. Bioaccumulation of microcystins in the food web: a field study of four Swedish lakes. *Inland Waters* 4: 91-104.

- Macek M., G. Vilaclara & A. Lugo. 1994. Changes in protozoan assemblages structure and activity in a stratified tropical lake. *Marine Microbial Food Webs* 8: 235-249.
- Mazur-Marzec H., L. Zeglinska & M. Plinski. 2005. The effect of salinity on the growth, toxin production, and morphology of *Nodularia spumigena* isolated from the Gulf of Gdańsk, southern Baltic Sea. *Journal of Applied Phycology* 17: 171-179.
- Oliva M. G., A. Lugo A., J. Alcocer, L. Peralta & L. A. Oseguera. 2009. Planktonic Bloom-Forming *Nodularia* in the Saline Lake Alchichica, Mexico. En Oren A, Naftz D. L. & Wurtsbaugh W. A. (Eds.), *Saline lakes around the world: unique systems eith unique values. Issues XV*. The S. J. & J. E. Quinney Natural Resources Research Library-Utah State University College of Natural Resources.
- O'Neil J. M., T. W. Davis, Burford M. A. & Gobler C. J. 2012. The rise of harmful cyanobacteria blooms: The potential roles of eutrophication and climate change. *Harmful Algae* 14: 313-334.
- Tavera R. & J. Komárek. 1996. Cyanoprokaryotes in the volcanic lake Alchichica, Puebla State, Mexico. *Algological Studies* 83: 511-538.
- Teikari J. E., S. Hou, M. Wahlsten, W. R. Hess & K. Sivonen. 2018. Comparative Genomics of the Baltic Sea Toxic Cyanobacteria *Nodularia spumigena* UHCC 0039 and Its Response to Varying Salinity. *Frontiers in Microbiology* 9: 1-13.
- Thomsen H. A. & K. R. Buck. 1991. Choanoflagellate diversity with particular emphasis on the Acanthoecidae. En D.J. Patterson & J. Larsen (Eds.): *The Biology of Free-living Heterotrophic Flagellates*. Clarendon Press, Oxford, 505 pp.
- Vilaclara G., M. Chávez, A. Lugo, H. González & M. Gaytán. 1993. Comparative description of crater-lakes basic chemistry in Puebla state, Mexico. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 25: 435-440.
- Xie L., P. Xie, L. Guo & L. Li. 2005. Organ distribution and bioaccumulation of microcystins in freshwater fish at different trophic levels from the eutrophic lake Chaohu, China. *Environmental Toxicology* 20: 293-300.

Contacto

Gloria Vilaclara. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.
vilaclara.unam@gmail.com

Ma. Guadalupe Oliva Martínez. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.





Plancton

Aidé Montiel-Martínez

Jorge Ciro-Pérez

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Arthropoda
Clase: Maxillopoda
Orden: Calanoida
Familia: Diaptomidae
Género: *Leptodiaptomus*
Especie: *Leptodiaptomus garciai* (Osorio-Tafall 1942)
Nombre común: Plancton

Alchichica es un cuerpo de agua muy interesante y particular, y así también son los organismos que lo habitan. El zooplancton de Alchichica, esos pequeños seres, en su mayoría animales, cuya locomoción depende del movimiento del agua, no son la excepción. *Leptodiaptomus garciai* es la especie dominante del zooplancton en la zona pelágica del lago, es decir, de las aguas abiertas (Fig. 8.1). *L. garciai* es un copépodo, al igual que los camarones, es un crustáceo, y como ellos poseen dos pares de antenas y un estado larval llamado nauplio. La mayoría de los copépodos de aguas epicontinentales no miden más de 2 mm. El resto de los integrantes de la comunidad zooplanctónica del lago que generalmente están presentes son dos rotíferos, *Brachionus*

sp. “México” (Alcántara-Rodríguez *et al.* 2012, Mills *et al.* 2017) y *Hexarthra jenkinsae* (Ciros-Pérez *et al.* 2015). Los rotíferos también son animales microscópicos, aunque de menor tamaño que los copépodos (de 0.2-0.5 mm, usualmente), entre otras características importantes tienen una corona de cilios que les sirve para generar corrientes y atrapar su alimento: microalgas para los que son herbívoros.

L. garciai representa la mayor parte del tiempo, entre el 88-100% de la cantidad de la materia viva (biomasa) del zooplancton (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2011, 2018). Además de esta contribución numérica significativa, *L. garciai*, como miembro del zooplancton, ocupa una posición central importante en las redes tróficas del lago.

De esta manera, tiene el potencial para influir tanto en los organismos de los que se alimenta (fitoplancton), como en los organismos que se alimentan de él (p.e., el pez *Poblana alchichica*) y viceversa (Ciros-Pérez *et al.* 2015).

Breve relato sobre su descripción, sinonimización y validación como especie endémica

L. garciai fue descrito originalmente por Osorio-Tafall en 1942. Cuando realizó la descripción, reconoció que era parecido a otro copépodo que había sido descrito en Albuquerque, Nuevo México, la especie *L. novamexicanus*. Sin embargo, después de comparar algunas características morfológicas seleccionadas por él, concluyó que las diferencias eran suficientes para considerar al copépodo calanoide de Alchichica como una especie diferente que sólo se encontraba en este lago y la denominó *Diaptomus (Leptodiaptomus) garciai*.

En 1953 Kincaid propuso ascender todos los subgéneros de los diaptómidos al nivel de género (Balcer *et al.* 1984), por lo que el nombre cambió a *L. garciai*. Sin embargo, menos de 20 años después, *L. garciai* fue sinonimizado con *D. (Leptodiaptomus) novamexicanus* Herrick, 1895 (véase, Wilson y Yeatman 1959), es decir, *L. garciai* dejó de considerarse una especie diferente. Wilson y Yeatman no explicaron las razones de la sinonimización. Sin em-

bargo, también invalidaron otros nombres de especies descritas por Osorio Tafall sin haber revisado material biológico (por ejemplo, *L. cuauhtemoci*; véase Suárez-Morales *et al.* 2000).

Cabe señalar que algunos de los caracteres morfológicos usados por Osorio-Tafall para distinguir a *L. garciai* de *L. novamexicanus* son ambiguos (por ejemplo, cerdas caudales cortas vs. cerdas caudales largas; véase Montiel-Martínez 2006). Además, usando herramientas para identificar organismos como son las claves taxonómicas, en este caso la de Wilson y Yeatman, el copépodo calanoide de Alchichica sería fácilmente identificado como *L. novamexicanus*.

Pero si consideramos las características fisicoquímicas de los cuerpos de agua que *L. novamexicanus* generalmente habita, Lugo *et al.* (1999) ya habían subrayado lo diferente que son respecto del lago Alchichica. Mientras que *L. novamexicanus* habita en sistemas de agua dulce (< 3 g L⁻¹) con un pH que va de ligeramente ácido a ligeramente básico, con alcalinidad total y dureza con valores de bajos a medios, Alchichica es hiposalino (8.3-9 g L⁻¹), presenta un pH básico (8.7-9.2) y alcalinidad y dureza altas.

Dados estos antecedentes, en 2006, se propuso que *L. garciai* formaba parte de un complejo de especies gemelas pero que en realidad es una especie biológica diferente y endémica de Alchichica (Montiel-Martínez 2006). Las especies gemelas son aquellas que se parecen mucho pero que, no pueden reproducirse entre sí y generar

descendencia fértil, y que, además, pueden desempeñar papeles ecológicos distintos.

Dado que la comparación morfológica por sí sola no era suficiente para analizar la verdadera identidad del copépodo de Alchichica, se comparó a *L. garciai* con poblaciones de *L. novamexicanus* con diferentes herramientas: 1) se realizó un análisis morfológico detallado de las poblaciones; 2) se utilizó un marcador molecular para analizar diferencias genéticas; 3) se analizó su capacidad potencial para habitar ambientes con diferente salinidad y, 4) se realizaron experimentos de reproducción intra e interpoblacionales. Los resultados fueron consistentes en mostrar que *L. garciai* es una especie diferente, por lo tanto, un taxón válido al encontrarse, diferencias morfológicas, genéticas, ecológicas y la incapacidad de reproducirse con *L. novamexicanus* (Montiel-Martínez *et al.* 2008).

Descripción de características morfológicas diagnósticas de la especie

Si bien es cierto que la descripción general de *L. garciai* que realizó Osorio-Tafall (1942) coincide con la descripción de *L. novamexicanus* (Herrick 1895, Wilson y Yeatman 1959), si se analiza con cuidado, existen diferencias sutiles pero consistentes. Estas diferencias se encuentran en estructuras relacionadas con la reproducción (ya sea en la etapa de reconocimiento de pareja, la captura de la hembra y la cópula), ta-

les como son, el segmento genital de la hembra (urosoma) y la anténula geniculada del macho (Montiel-Martínez *et al.* 2008) (Fig. 8.2).

La reproducción en los copépodos calanoides es similar entre ellos. Primero, el macho es atraído química y mecánicamente por la hembra.

Algunos autores han sugerido que las ondas en el agua producidas por las diferentes estructuras del cuerpo del copépodo pueden ser relevantes en el reconocimiento de la hembra. Una vez que la hembra es detectada, el macho la atrapa por el urosoma con la anténula geniculada. El macho se coloca de manera que su quinta pata (pata V) entra en contacto con el urosoma de la hembra, haciendo un segundo reconocimiento químico y mecánico. En



Figura 8.1. Hembra de *L. garciai*. (Microfotografía: Yolanda Hornelas-Orozco y Aideé Montiel-Martínez).

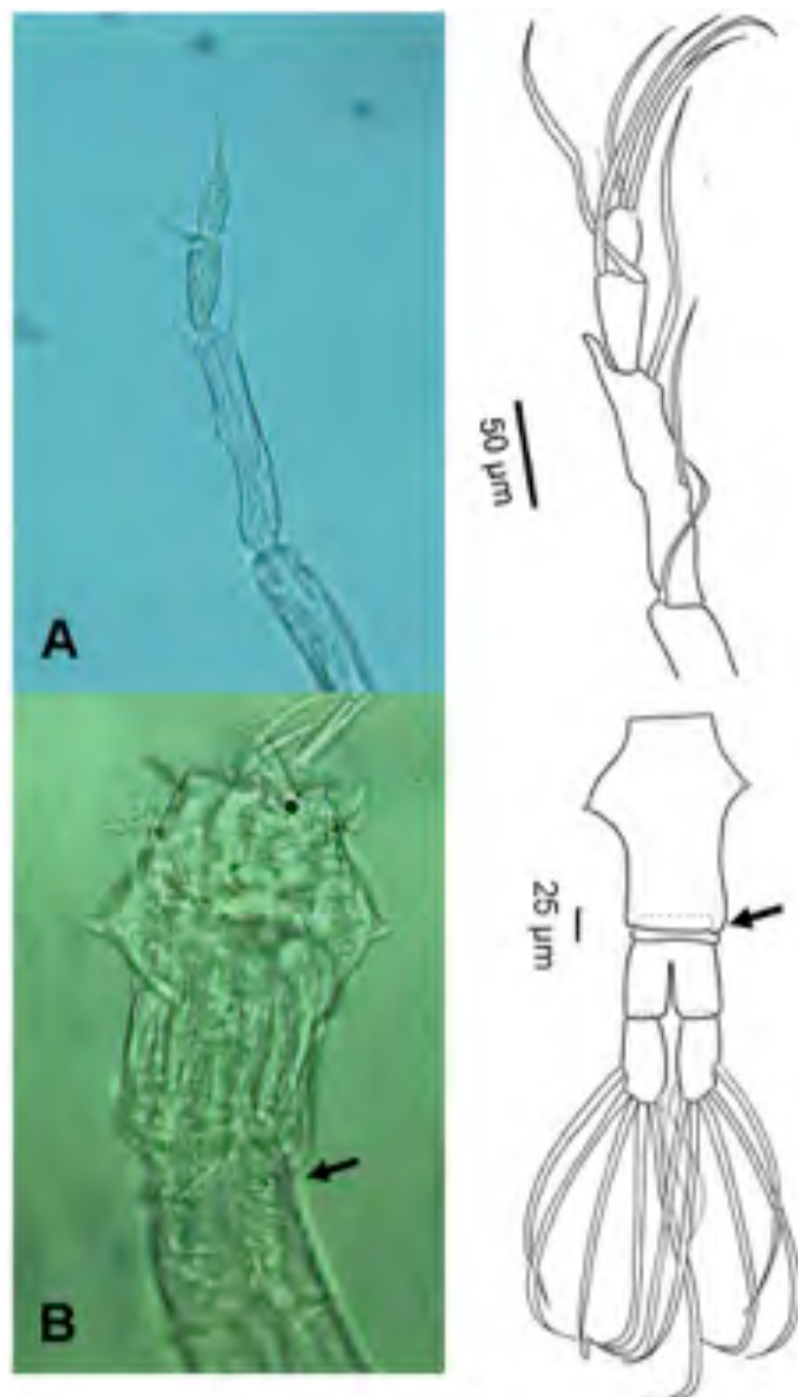


Figura 8.2. Caracteres morfológicos de *L. garciai*, A. Detalle del proceso del margen derecho del segmento genital de la hembra B. Detalle del proceso en antepenúltimo segmento de la anténula derecha del macho. (Figura: Aideé Montiel-Martínez).

algunas especies de copépodos se ha descrito que, con la quinta pata izquierda, el macho limpia el tegumento de la hembra antes de colocar el espermatóforo (Mauchline 1998). El espermatóforo es una cápsula en forma de plátano que contiene los espermatozoides. Los detalles de la cópula de *L. garciai* siguen sin ser esclarecidos, aunque observar hembras con el esperma-

tóforo pegado en condiciones de laboratorio, es relativamente sencillo.

Así, diferencias morfológicas en estructuras relacionadas con la reproducción, aunque sean sutiles, pueden ser importantes para impedir la reproducción entre especies que, a nuestros ojos, pueden ser muy parecidas. Entonces, se compararon estructuras importantes involucradas en el

reconocimiento de pareja en cuatro poblaciones de copépodos: 1) *L. garciai* de Alchichica, el copépodo de interés; 2) *L. novamexicanus* de Castle Lake, California, EE. UU., proveniente de un lugar muy cercano a donde *L. novamexicanus* se describió por primera vez; 3 y 4) *L. novamexicanus* de dos bordos del Estado de México, copépodos morfológicamente muy parecidos a *L. garciai* pero que habitan en cuerpos de agua dulce. El análisis detallado del urosoma y de la anténula geniculada del macho permitió reconocer diferencias entre *L. garciai* y *L. novamexicanus*. Se encontró que todas las hembras presentan un proceso, una especie de “bulto”, en el margen posterior derecho del urosoma. Sin embargo, el tamaño del proceso difiere entre poblaciones. La longitud del proceso en las hembras de *L. novamexicanus* (provenientes de las tres poblaciones estudiadas) es de al menos 2/3 de la longitud del siguiente segmento del urosoma. Por otro lado, en las hembras de *L. garciai*, el proceso mide aproximadamente 1/3 del siguiente segmento (Fig. 8.2).

En el caso de los machos de las diferentes poblaciones, la longitud del proceso lateral del antepenúltimo segmento de la anténula geniculada es distinta. En los machos de *L. novamexicanus* mide más de la mitad de la longitud del siguiente segmento de la anténula, mientras que en los machos de *L. garciai* mide menos de la mitad (Fig.8.2).

Es así como el urosoma de la hembra y la anténula geniculada del macho son estructuras que pueden ser importantes para

explicar por qué *L. garciai* y *L. novamexicanus* no pueden reproducirse entre sí.

Análisis moleculares

Desafortunadamente aún no se cuenta con la comparación genética de *L. garciai* con *L. novamexicanus* proveniente de la localidad donde se describió originalmente (localidad tipo) o de localidades más cercanas a ella. Sin embargo, *L. garciai* si ha sido comparado molecularmente con tres poblaciones de *L. novamexicanus* provenientes de distintos cuerpos de agua del Estado de México (Elías-Gutiérrez *et al.* 2008, Montiel-Martínez *et al.* 2008). Para hacerlo se usaron secuencias del gen mitocondrial citocromo oxidasa subunidad I (COI). Los resultados mostraron que los copépodos de Alchichica y los del Estado de México genéticamente están separados (con una divergencia $\geq 4.4\%$). Cabe mencionar que las poblaciones de *L. novamexicanus* también son diferentes entre sí (divergencias genéticas $> 6.4\%$), lo que haría más interesante la comparación con secuencias de copépodos provenientes de Albuquerque, Nuevo México y los copépodos mexicanos.

Aislamiento reproductivo

Las grandes diferencias genéticas pueden tener como consecuencia el aislamiento reproductivo. El aislamiento reproductivo ocurre cuando hay barreras (conductuales, ecológicas, morfológicas, genéticas, químicas,

etc.) que impiden que un macho y una hembra puedan tener crías fértiles. Además de la evidencia morfológica y genética, los resultados de nuestros estudios mostraron que los copépodos de Alchichica, *L. garciai*, no pudieron reproducirse con los copépodos *L. novamexicanus* provenientes de un bordo del Estado de México. No se presentaron hembras fecundadas. Cabe recordar que, en Alchichica, *L. garciai* habita en salinidades $>8 \text{ g L}^{-1}$, mientras que *L. novamexicanus* habita en cuerpos de agua dulce $< 3 \text{ g L}^{-1}$. En el caso de la población de *L. novamexicanus* utilizada, el bordo presentaba una salinidad $< 1 \text{ g L}^{-1}$. Para realizar el experimento se usó una salinidad en la que pudieran sobrevivir ambos copépodos: 2.5 g L^{-1} . Ese cambio en la salinidad les afectó a ambos pero más a *L. novamexicanus*. Pocas hembras de *L. novamexicanus* alcanzaron la madurez ($< 20\%$) y de ellas, ninguna fue copulada ni fertilizada por los machos de su población.

En el caso de *L. garciai*, todas las hembras fueron copuladas y fertilizadas a 2.5 g L^{-1} por machos de su población. Sin embargo, el número de huevos por puesta disminuyó (3.2 ± 0.5), así como el número de nauplios que salieron de los huevos (porcentaje de eclosión: $21 \pm 7.9\%$) por efecto de la disminución de salinidad.

Si bien es cierto que *L. novamexicanus* estuvo claramente afectado por la salinidad, en caso de que las hembras hubieran sido reconocidas como parejas potenciales por machos de *L. garciai*, éstas muy probablemente hubieran sido copuladas y hu-

bieran presentado el espermátforo adherido. En algunos casos, se ha documentado que los machos llegan a copular con hembras aunque las perciban inactivas (Kelly y Snell 1998). De esta manera, la ausencia de reproducción entre *L. garciai* y *L. novamexicanus* muestra que están aisladas reproductivamente.

Algunos datos sobre su biología

El ciclo biológico de *L. garciai* es típico de los copépodos calanoides (Mauchline 1998). El saco de huevos permanece sujeto al poro genital de la hembra. Cabe mencionar que, aunque se le denomine saco, no se ha comprobado la existencia de una bolsa *per se*. Los huevos de los copépodos calanoides pueden ser de dos tipos, subitáneos o de resistencia (Mauchline 1998). Hasta ahora no se han encontrado huevos de resistencia de *L. garciai* en Alchichica (Ayala-Arce 2008). Los huevos de resistencia aparecen en poblaciones que enfrentan condiciones ambientales adversas a través del tiempo (por ejemplo, falta de recursos, depredadores, anoxia, etc.). La ausencia de huevos de resistencia en *L. garciai* podría implicar que las condiciones en Alchichica para este copépodo le permiten prescindir de esta estrategia.

El tamaño de la puesta de *L. garciai* varía entre 1 y 16 huevos con un promedio mensual que es distinto a lo largo del tiempo, según la disponibilidad de alimento (Fig. 8.3) (Hernández-Martínez 2014, Ortega-Mayagoitia *et al.* 2018). De los huevos,

eclosiona un nauplio que pasará por seis estadios (nauplios I-VI). La descripción y la duración de cada estadio aún no se ha analizado en detalle para *L. garciai*.

Posteriormente, de nauplio VI muda a copepodito I, el primero de cinco estadios post-naupliares (copepodito I-VI, el último corresponde al estadio adulto). Cada nuevo estadio se caracteriza por el desarrollo progresivo de la segmentación, la diferenciación de los apéndices y el incremento en el tamaño. De esta manera, el copepodito I tendrá dos pares de patas, el copepodito II, tres pares y el copepodito III, cuatro pares. La pata V aparece al mudar a copepodito IV, volviéndose más compleja en el copepodito V y estará completamente formada en el adulto. A partir de copepodito IV puede identificarse si el copépodo llegará a ser hembra o macho. En los copepoditos V machos se distingue la garra de la pata V derecha y la anténula derecha geniculada. En los copepoditos V hembras se nota el segmento genital ya fusionado.

En condiciones de laboratorio, más del 70% de copepoditos III logró mudar a copepodito IV en tres días, sin embargo, la cantidad de esos copepoditos III que llegó a adulto fue menor al 60% ($55 \pm 2.6\%$ evaluado en siete días). Si bien es cierto que el porcentaje de organismos que llegó a adulto es bajo, en experimentos de reproducción el 100% de las hembras fue copulada y fertilizada teniendo un porcentaje de eclosión mayor al 90% (Montiel-Martínez 2008).

Pese a ser la especie dominante de la zona pelágica y ocupar un papel importan-

te en la dinámica de la comunidad acuática, existen detalles de la biología de *L. garciai* que aún se desconocen y esperan ser descritos.

L. garciai: salinidad y la temperatura

L. garciai está adaptado a las condiciones de salinidad que el lago Alchichica presenta ($8.3-9 \text{ g L}^{-1}$). De esta manera, posee una baja plasticidad fenotípica a la disminución de la salinidad. Es decir, posee una baja capacidad de adaptación a los cambios de salinidad. Resultados experimentales mostraron que *L. garciai* y *L. novamexicanus* no comparten el mismo hábitat pues no se desempeñan de manera eficiente en el mismo rango de salinidad. La supervivencia, desarrollo y reproducción de *L. garciai* se vieron afectadas en salinidades $\leq 4.5 \text{ g L}^{-1}$. Por otro lado, las salinidades $\geq 2.5 \text{ g L}^{-1}$, tuvieron efectos más drásticos sobre *L. novamexicanus* (Montiel-Martínez *et al.* 2008).

De esta manera, la tolerancia a la salinidad representa una barrera fisiológica determinada por los genes de los organismos, lo que puede terminar aislando a las poblaciones al punto de separarlas en especies biológicas diferentes.

L. garciai también está adaptado a las variaciones de temperatura que se observan en Alchichica (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2018). La plasticidad fenotípica a la temperatura, es decir, los cambios en los organismos en respuesta a los cambios de

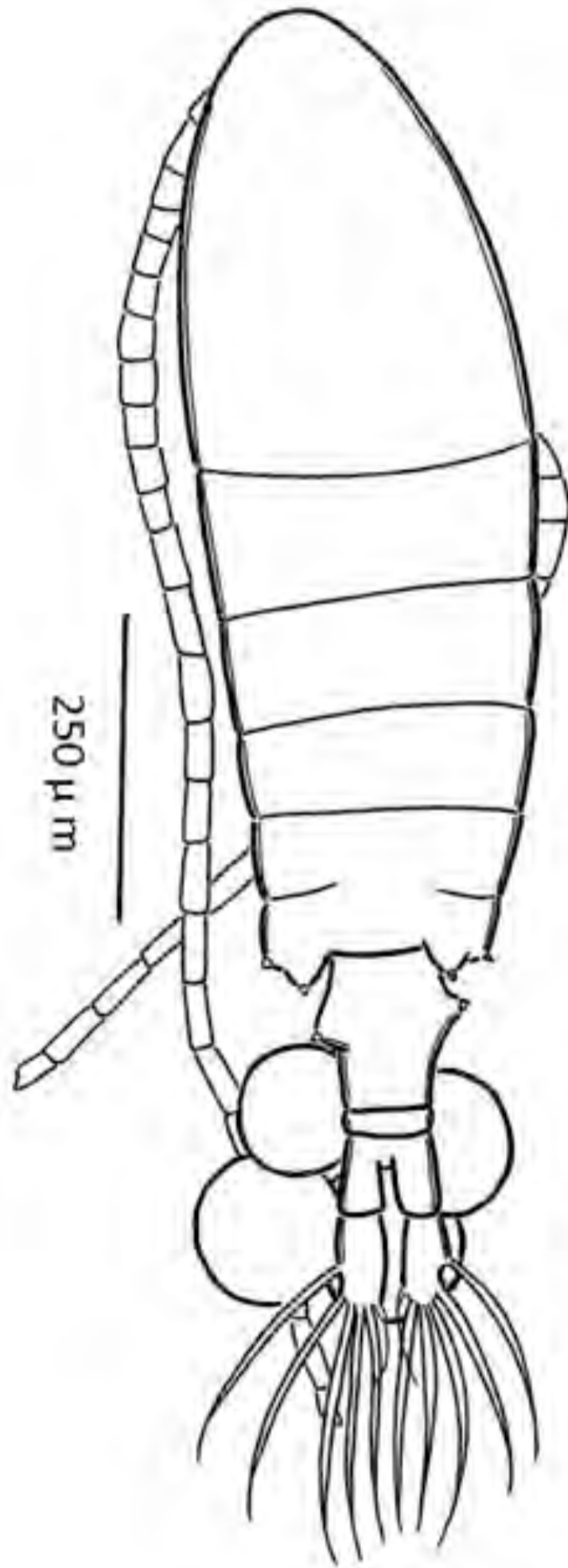


Figura 8.3. Vista dorsal de la hembra de *L. garciai* con huevos. (Figura: Aideé Montiel-Martínez).

temperatura, ha sido más estudiada en los cuerpos de agua templados. Esto se debe a que, de acuerdo con la hipótesis de variabilidad climática, los organismos que habitan más cerca de los polos del planeta están expuestos a mayores fluctuaciones en la temperatura y por eso, deben presentar mayor plasticidad fenotípica para afrontar estas condiciones cambiantes. En los trópicos, la temperatura no varía tanto a lo largo del año por lo que, la plasticidad fenotípica dirigida por la temperatura ha sido considerada, incluso, inexistente (Molina-Montenegro y Naya 2012).

Así, el tamaño de los organismos ha sido relacionado con la temperatura en cuerpos de agua templados, mientras que en los trópicos se ha sugerido que el factor que influye sobre el tamaño del cuerpo es el alimento, en este caso, el fitoplancton. En Alchichica, la variación anual de temperatura es de tan sólo 3.2°C (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2018), muy lejos de los 14°C de variación térmica media que se han sugerido como los necesarios para influir en el tamaño de los organismos sobre el efecto del alimento (Riccardi y Mariotto 2000). Además, en Alchichica la variación de la cantidad del alimento de los copépodos es muy alta, por ejemplo, < 0.5 mg L⁻¹ de biomasa fitoplanctónica en algunas partes del lago en septiembre y dos meses después, diez veces más biomasa fitoplanctónica (6 mg L⁻¹; Hernández-Martínez 2014).

Estos datos sugieren que el fitoplancton debe ser el responsable de regular el tamaño de los copépodos de Alchichica.

De esta manera, Ortega-Mayagoitia *et al.* (2018) evaluaron la influencia de la temperatura y el alimento en diferentes características de la historia de vida de *L. garciai* para probar la existencia de plasticidad térmica en estas condiciones tropicales propias de Alchichica. Encontraron que, en efecto, el alimento tuvo una influencia positiva sobre la reproducción, donde a mayor biomasa fitoplanctónica hubo más huevos y nauplios por hembra. Sin embargo, también encontraron que, contrario a lo esperado, *L. garciai* si presenta cambios en diversos rasgos de su historia de vida en respuesta a las pequeñas variaciones de temperatura, es decir, presenta plasticidad térmica.

Estos resultados mostraron que a mayor temperatura, menor tamaño y biomasa de las hembras y el tamaño de los huevos. La diferencia en el tamaño de las hembras es muy evidente, teniendo el menor tamaño promedio en agosto con 821.1 ± 18.3 µm y el mayor en diciembre con 1025.6 ± 51.1 µm (Hernández-Martínez 2014). Este patrón ha sido observado en otros animales. Si bien, las hembras grandes producen huevos de mayor tamaño, éstos tienen un porcentaje de eclosión menor comparado con los huevos de menor tamaño. Esta observación parecería indicar que las hembras de menor tamaño son más exitosas, lo que daría como resultado que, paradójicamente, la plasticidad térmica no tuviera un impacto positivo en la eficacia biológica del copépodo. De esta manera, es necesario evaluar el desarrollo y reproducción de

los nauplios eclosionados de huevos pequeños y grandes para tener el panorama completo del desempeño de las crías (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2018).

Interacciones bióticas: ¿Con quiénes y cómo interactúa *L. garciai*?

L. garciai y el fitoplancton

Las diferentes especies que constituyen a la comunidad fitoplanctónica de Alchichica son todo un reto para el zooplancton herbívoro. Hernández-Martínez (2014) observó de marzo de 2008 a enero de 2009, ocho especies de microalgas dominantes. Entre el 44 y el 99% de la biomasa total durante ese ciclo anual estuvo representada por la diatomea *Cyclotella alchichicana*. Si se mide a esta diatomea por la parte más larga que tiene (dimensión axial lineal) su promedio es de $51 \pm 5 \mu\text{m}$, lo que la hace estar fuera del tamaño de recursos que comúnmente consumen otros copépodos del género *Leptodiaptomus* (Vanderploeg y Paffenhöfer 1985). La cianobacteria *Nodularia aff. spumigena*, así como la diatomea *Chaetoceros* y las clorofitas *Oocystis parva* y *Oocystis sp.* son otros miembros del fitoplancton encontrados y que podrían considerarse que son de difícil consumo porque forman filamentos, cadenas y mucílago, respectivamente. Las otras cuatro especies restantes, las diatomeas *Cyclotella choctawhatcheana* y *Chaetoceros elmorei*,

así como las clorofitas *Monoraphidium dybowskii* y *M. minutum* miden $\leq 10 \mu\text{m}$, sin embargo, sólo las dos primeras llegan a presentar densidades importantes en temporadas cortas del año (no más de cuatro meses) (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2011, Hernández-Martínez 2014).

De esta manera, pareciera que *L. garciai* tiene muy pocas opciones de alimento en el fitoplancton, sin embargo, este copépodo explota esas pocas opciones de una manera sorprendente. Mediante experimentos para evaluar la dieta potencial del copépodo, se encontró que consumen *C. choctawhatcheana* y *M. dybowskii*, especies que, dado su tamaño eran de esperarse que formaran parte de su dieta. Por otro lado, especies menos probables de ser consideradas como recursos, ya sea por su tamaño, su toxicidad potencial, o bien por el mucílago que producen, también son consumidas (Hernández-Martínez 2014).

Así, los resultados también mostraron que, *C. alchichicana* llega a ser consumida al menos en enero, cuando en la población de copépodos se encuentran fenotipos de tamaño relativamente grande ($> 1000 \mu\text{m}$). Cuando la población presenta tamaños menores, no se observa el consumo de la diatomea. Por estos resultados, pareciera que la plasticidad fenotípica observada en el tamaño de las hembras adultas de *L. garciai* tendría un efecto directo sobre la cantidad y calidad del recurso que puede consumir al ampliar el espectro de tamaños que ingieren (Ortega-Mayagoitia *et al.* 2018).

Dentro de las especies que más consume este copépodo está *Nodularia* aff. *spumigena*. Los filamentos de esta cianobacteria, dado su tamaño (promedio de dimensión axial lineal: $334 \pm 193 \mu\text{m}$) parecieran ponerla fuera del rango de partículas que pueden servir de alimento a *L. garciai*. Además, se ha reportado en otros sistemas que esta alga produce nodularina, una sustancia presumiblemente tóxica (Lira *et al.* 2005). A pesar de que se ha registrado la presencia de nodularina en Alchichica (ver capítulo *La lama*), se ha demostrado que otros calanoides son resistentes a la nodularina e incluso han encontrado en los filamentos en descomposición de *N. aff. spumigena* un alimento rico en bacterias y protozoos (Koski y Schmidt 2002). Esto mismo podría estar sucediendo en Alchichica, pues el consumo sucede cuando el florecimiento de esta especie decae (Hernández-Martínez 2014).

Otra de las especies que se observó que fue consumida por *L. garciai* fue *O. parva* que forma colonias mucilaginosas (Hernández-Martínez 2014). Esa capa de mucílago protege al alga contra la digestión, por lo que los nutrientes no pueden ser asimilados por el zooplancton. Sin embargo, se ha documentado que algas mucilaginosas pueden ser consumidas por otros copépodos (*Eudiaptomus* sp.) cuando hay escasez de fitoplancton de mayor valor nutricional (DeMott 1989), lo cual también puede estar pasando en Alchichica.

Estos resultados hacen dudar sobre la supuesta preferencia de un tamaño res-

tringido de partículas por parte de los copépodos y muestran que *L. garciai* es un omnívoro con hábitos flexibles, que es capaz de alimentarse de las diferentes especies que se presentan a lo largo del año en Alchichica. El poder alimentarse de tantas especies de fitoplancton entre otras cosas, hace que su nicho trófico sea amplio. Esto último es una de las razones que le permite ser la especie dominante del zooplancton pelágico en Alchichica (Ortega-Maya-goitia *et al.* 2011). Otra de las razones por la cual es tan exitoso, es su baja concentración umbral de alimento (Ciros-Pérez *et al.* 2015).

La concentración umbral de alimento es la cantidad de comida necesaria para que la tasa de crecimiento de la población sea cero, es decir, que la población se mantenga compensando las muertes con nuevos nacimientos. Ciros-Pérez *et al.* (2015) determinaron la concentración umbral de alimento de los dos rotíferos que habitan la zona pelágica de Alchichica, así como la del copépodo. Encontraron que, aunque para *L. garciai* no fue posible determinar la concentración umbral de recursos, en la cantidad de alimento donde *Brachionus* y *Hexarthra* ya no crecen, el copépodo sigue presentando una tasa de crecimiento específica positiva. Es decir, en Alchichica, donde la disponibilidad de alimento es baja, *L. garciai* es un mejor competidor al necesitar menos cantidad de comida que los rotíferos.

Además, Ciros-Pérez *et al.* (2015) evaluaron también la cantidad relativa de la reserva alimenticia de los rotíferos y el copé-

podo, encontrando que *Brachionus* fue la especie que almacenó una mayor cantidad de recursos seguido de *L. garciai*. Sin embargo, en condiciones de inanición, los nauplios de *L. garciai* sobrevivieron más tiempo, perdiendo biomasa más lentamente que los rotíferos.

De esta manera, *L. garciai* parece presentar diferentes características fisiológicas que le permiten resistir más tiempo en un ambiente donde los recursos son escasos o no están disponibles (Ortega-Maya-goitia *et al.* 2011), por ejemplo, una baja concentración umbral de alimento, la acumulación de una alta cantidad de reservas energéticas y el uso eficiente de estas reservas acumuladas.

Así, *L. garciai* parece estar adaptado a la variación de la disponibilidad y calidad de alimento en Alchichica. Ortega-Maya-goitia *et al.* (2018) encontraron una clara respuesta fenotípica a la disponibilidad de alimento. De esta manera, registraron un incremento en el número de huevos por puesta, en el esfuerzo reproductivo relativo y en el número de nauplios por hembra cuando hay más alimento disponible. Estos incrementos se ven reflejados en un mayor éxito reproductivo del copépodo. Interesantemente y contrario a lo esperado, el tamaño de los huevos negativamente estuvo correlacionado a la tasa de eclosión, además de no estar relacionada con la disponibilidad de alimento. Es decir, huevos de mayor tamaño presentaron un menor porcentaje de eclosión. Esta aparentemente menor eficiencia biológica de los huevos

de mayor tamaño es una pregunta cautivadora que queda abierta a ser estudiada en este, ya de por sí, interesante copépodo.

La distribución vertical de *L. garciai* en Alchichica y su relación con *Poblana alchichica*

La distribución vertical, así como la migración a través de decenas de metros en el lago realizada por los copépodos ha sido descrita y analizada por Lugo *et al.* (1999) y Ciro-Pérez *et al.* (2015), respectivamente.

Lugo *et al.* (1999) sugieren que los cambios en la distribución estuvieron relacionados principalmente con la variación en la disponibilidad del fitoplancton y a las diferentes condiciones ambientales dadas por la dinámica térmica del lago; por ejemplo, mayores concentraciones de oxígeno disuelto pudieran explicar la mayor abundancia del copépodo en la época de mezcla. Por otro lado, Ciro-Pérez *et al.* (2015) encontraron que, durante todo el año, *L. garciai* exhibe un patrón de migración vertical “normal” (Lampert 1993): los copépodos de estadios de desarrollo de mayor tamaño (copepoditos IV y V y adultos) migran a zonas profundas con menor cantidad de luz y durante la noche ascienden a zonas más superficiales.

La evasión a la depredación por peces es considerada la causa última que dirige la migración vertical del zooplancton (Lampert 1993). *P. alchichica* (Atheriniformes) es

un pez endémico y depredador potencial de *L. garciai*. La dieta de *P. alchichica* ha sido examinada por Flores-Negrete (1991). Este reporta que los copépodos si son integrantes de la dieta del pez. Sin embargo, no menciona las especies y dado que los muestreos fueron realizados en la zona litoral, muy probablemente, los copépodos consumidos fueron preferentemente ciclopoideos (por ejemplo, *Eucyclops* cf. *pectinifer* o *Acanthocyclops* sp.) y harpacticoides (*Cletoamptus gomezi*; Suárez-Morales *et al.* 2013). El autor considera que, dados sus resultados, la dieta de *P. alchichica* está constituida principalmente por presas bentónicas. No obstante, el consumo de *L. garciai* también ha sido observado.

Sin embargo, algunos estudios sugieren que pese a ser un consumidor de zooplancton (Ciros-Pérez *et al.* 2015), el pez ejerce una baja presión de depredación sobre *L. garciai* (Lugo *et al.* 1999). Una de las razones puede estar relacionada con la distribución del pez dentro del lago. La mayor parte de la población de *P. alchichica* (> 60%) se encuentra distribuida en la zona litoral asociada a los estromatolitos que se encuentran en la periferia (Arce *et al.* 2011), mientras que *L. garciai* se distribuye principalmente en la zona pelágica. Con respecto a la parte de la población de *P. alchichica* que se encontró en la zona pelágica, su distribución coincide con la de los copépodos. Es decir, los peces, durante el día, se ubican en zonas profundas con menor luz, igual que los copépodos (Ciros-Pérez *et al.* 2015). De esta manera, la migración vertical reali-

zada por los copépodos no los hace evadir espacialmente por completo a su depredador potencial, aunque sí los coloca en condiciones de baja detectabilidad visual.

Se sabe que la intensidad de la migración a lo largo de la columna de agua y los beneficios de la misma están relacionados con la abundancia de los peces (Loose y Dawidowickz 1994). En el caso de Alchichica, la densidad de la población de *P. alchichica* es extremadamente baja comparada con otros lagos oligotróficos (< 10 veces; Arce *et al.* 2011). De esta manera, los detalles de la interacción entre *P. alchichica* y *L. garciai* aún no han sido develados del todo. Así, el grado de intensidad de la presión de depredación de *P. alchichica* sobre *L. garciai* y su influencia sobre la distribución y la eficiencia biológica del copépodo son preguntas que aún necesitan respuestas.

Otra pregunta que permanece abierta sobre la relación entre *P. alchichica* y *L. garciai* es el papel de *L. garciai* como primer hospedero intermediario de *Ligula intestinalis* (Cestoda). *L. intestinalis* es un parásito con un ciclo biológico complejo que involucra a dos hospederos intermediarios, un copépodo y un pez, como primer y segundo hospedero, respectivamente. Finalmente, el hospedero definitivo es un ave. En el pez, *L. intestinalis* puede inhibir el desarrollo de las gónadas, afectando su reproducción, además de afectar su nado haciéndolo más propenso a ser depredado (Loot *et al.* 2001).

P. alchichica está altamente parasitado. Alcocer *et al.* (2010) reportaron que la población parasitada a lo largo del año va del

10 al 100%. Los autores hacen hincapié en que, previo a las máximas cantidades de peces parasitados (96-100% en la estratificación temprana), se presentaron abundancias máximas de *L. garciai*. Sin embargo, no se conoce cuáles son las especies de copépodos parasitados y su prevalencia en Alchichica, o bien, los efectos del gusano plano sobre los microcrustáceos. Asimismo, dada la simplicidad de la estructura de la comunidad acuática, Alchichica es un lugar excelente para probar hipótesis ecológicas y evolutivas que involucren a *L. intestinalis*.

Conclusión

L. garciai es el animal pelágico dominante en Alchichica. No sólo su posición en las redes tróficas, sino también su tamaño pequeño, su ciclo de vida rápido, lo relativamente fácil que es colectarlo, monitorearlo en el lago, o bien, mantenerlo y experimentar en laboratorio, lo convierten en un modelo adecuado para probar hipótesis ecológicas y evolutivas. A estas ventajas se suman la simplicidad de las comunidades fitoplanctónica, zooplanctónica y de depredadores potenciales en la zona pelágica de Alchichica, así como la predictibilidad de su ciclo hidrológico cuyos periodos de mezcla y estratificación poseen características físicas, químicas y biológicas regulares a lo largo del ciclo anual (Alcocer *et al.* 2000). Es así como *L. garciai* es un modelo ideal en un escenario extremadamente conveniente que ha permitido formular y

responder preguntas que hoy permiten conocer más del papel que tiene este copépodo en el sistema y, asimismo, incrementar el número de interrogantes sobre él. Así pues, queda pendiente, por ejemplo, su comparación morfológica y genética con *L. novamexicanus* de la localidad tipo. Asimismo, existen varios aspectos de su biología, en particular de su comportamiento reproductivo que no han sido descritos y que sería muy interesante abordar desde el punto de vista morfológico para elucidar el papel de las diferencias anatómicas en el aislamiento reproductivo. Con respecto a la influencia de los parámetros ambientales, la plasticidad fenotípica del copépodo a la temperatura ha sido demostrada, sin embargo, es necesario esclarecer el impacto que tiene en la eficiencia biológica de la especie. Por otro lado, mientras que su relación con el fitoplancton ha sido ampliamente abordada, con respecto a la interacción de *L. garciai* y *P. alchichica*, la información es muy escasa. Así, aunque aún se conoce poco de *L. garciai*, paradójicamente es una de las especies de los que más se sabe de Alchichica, y probablemente es el copépodo mexicano del que más información documentada se conoce, así como uno de los mejor descritos en el mundo. Sin embargo, hay más preguntas abiertas que temas cerrados acerca de la biología, ecología y la evolución de este maravilloso copépodo, lo que lo coloca como candidato a ser uno de los modelos biológicos de especies acuáticas en las aguas epicontinentales mexicanas que

permitan entender los procesos que han conducido sus patrones de adaptación y que han modelado a estos fascinantes miembros del zooplancton. Desafortunadamente, Alchichica y, por ende, todos los seres vivos que habitan en este lago, enfrentan graves problemas. Dentro de los principales se encuentran la sobreexplotación del manto freático y el cambio climático. Ambos problemas impactan directamente sobre la cantidad de agua del lago. Los lagos al envejecer van perdiendo profundidad hasta que desaparecen, este proceso de manera natural lleva de cientos a miles de años pero con la intervención del hombre puede suceder en décadas. Tanto en la extracción del agua como en el cambio climático, el ser humano como especie tiene un papel protagonista. De esta manera, también se debe asumir la responsabilidad y el compromiso por tomar acciones concretas que impacten a corto plazo, desde acciones ciudadanas de concientización hasta castigos más severos contemplados en la legislación. Si no se hacen hoy, mañana Alchichica con toda su historia evolutiva impactante, con toda la biodiversidad y especies que no existen en ningún otro lugar del mundo, será sólo un recuerdo.

Agradecimientos

Agradecemos a Yolanda Hornelas Orozco (Servicio Académico de Microscopía Electrónica de Barrido, ICMYL, UNAM) por su ayuda en el análisis de MIB.

Referencias

- Alcocer, J., E. Arce, L. Zambrano & X. Chiappa-Carrara. 2010. *Poblana alchichica*: A threatened silverside species? *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*: 1429-1432.
- Arce, E., J. Alcocer, X. Chiappa-Carrara & L. Zambrano. 2011. Hydroacoustic study of spatial and temporal distribution of *Poblana alchichica* (de Buen, 1945) in Lake Alchichica, Mexico. *Journal of Fisheries and Aquatic Science* 6: 624-632.
- Ciros-Pérez J, E. Ortega-Mayagoitia & J. Alcocer. 2015. The role of ecophysiological and behavioral traits in structuring the zooplankton assemblage in a deep, oligotrophic, tropical lake. *Limnology and Oceanography* 60: 2158-2172.
- Elías-Gutiérrez, M., F.M. Jerónimo, N. Ivanova, M. Valdez-Moreno & P.D.N. Hebert. 2008. DNA barcodes for Cladocera and Copepoda from Mexico and Guatemala, highlights and new discoveries. *Zootaxa* 42: 1-42.
- Flores Negrete, E. 1991. Aportaciones al estudio biológico del "charal" *Poblana letholepis* (Pisces: Atherinidae) del lago maar La Preciosa (Las Minas), Puebla, México. Tesis de licenciatura en Biología, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Hernández Martínez, O. 2014. Variación temporal de la biología reproductiva de *Leptodiptomus garciai* (Copepoda: Calanoida) en el lago Alchichica Puebla, México. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Lugo, A., M. E. González, M. R. Sánchez & J. Alcocer. 1999. Distribution of *Leptodiptomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida) in a Mexican hyposaline lake. *Revista de Biología Tropical* 47: 141-148.
- Montiel-Martínez, A. 2006. Análisis comparativo de poblaciones parapátricas de *Leptodiptomus novamexicanus* (Copepoda: Calanoida): ¿Especie eurihalina o com-

Maestría, Universidad Nacional
Autónoma de México.

Montiel-Martínez, A., J. Ciro-Pérez, E. Ortega-Mayagoitia & M. Elías-Gutiérrez. 2008. Morphological, ecological, reproductive and molecular evidence for *Leptodiptomus garciai* (Osorio-Tafall 1942) as a valid endemic species. *Journal of Plankton Research* 30: 1079-1093.

Ortega-Mayagoitia, E., J. Ciro-Pérez, & M. Sánchez-Martínez. 2011. A story of famine in the pelagic realm: Temporal and spatial patterns of food limitation in rotifers from an oligotrophic tropical lake. *Journal of Plankton Research* 33: 1574-1585.

Ortega-Mayagoitia, E., O. Martínez-Hernández, & J. Ciro-Pérez. 2018. Phenotypic plasticity of life-history traits of a calanoid copepod in a tropical lake: Is the magnitude of thermal plasticity related to thermal variability? *PloS ONE* 13: e0196496.

Osorio-Tafall, B. F. 1942. Un *Diaptomus* del México Central (Copepoda, Diaptomidae). *Revista Brasileira de Biologia* 2: 147-154.

Contacto

Aideé Montiel-Martínez. Facultad de Ciencias de la Electrónica, Licenciatura en Gestión de Ciudades Inteligentes y Transiciones Tecnológicas, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, Ciudad Universitaria, C.P. 72570, Puebla, Puebla.
montielmartineza@gmail.com

Jorge Ciro-Pérez. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.





La cochinilla acuática

Elva Escobar

Javier Alcocer

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Arthropoda
Clase: Malacostraca
Orden: Isopoda
Familia: Asellidae
Género: *Caecidotea*
Especie: *Caecidotea williamsi* (Escobar-Briones y Alcocer 2002)
Nombre común: La cochinilla acuática

Los isópodos son un grupo de invertebrados (animales sin esqueleto interno) acuáticos que pertenecen a los animales llamados crustáceos. La mayor parte de los crustáceos son acuáticos, los isópodos junto con otros grupos como los anfípodos y los decápodos también tienen representantes terrestres.

Caecidotea williamsi (Fig. 9.1) es una especie de isópodo endémica descrita para el lago Alchichica. En general los isópodos son de talla pequeña como es el caso de *Caecidotea williamsi*. Los isópodos se agrupan en lo que técnicamente se conoce como el superorden Peracarida. Junto con los anfípodos se distribuyen en todos los hábitats marinos mientras ocupan ecosistemas de la zona intermareal y hasta el

mar profundo. En los lagos, los isópodos ocurren desde la zona litoral y a lo largo de diversos intervalos de profundidad. En Alchichica *Caecidotea williamsi* habita desde los 3 y hasta los 30 m de profundidad, siempre en presencia de una concentración de oxígeno disuelto no menor a 1 mg L⁻¹. Por otro lado, hay que mencionar que *Caecidotea williamsi* es la única especie de isópodo que se ha encontrado habitando aguas epicontinentales salinas en América; la otra especie que habita lagos salinos en el mundo (*Haloniscus searlei*) se encuentra y es endémico de Australia.

La presencia de isópodos en aguas epicontinentales está limitada a casi 500 especies a nivel mundial, en comparación con los mares en donde hay casi 4,500 es-

pecies y en tierra, donde se les conoce con el nombre vulgar de “cochinillas”, donde hay unas 5,000 especies. El número de especies confinadas a aguas epicontinentales en México rebasa las 50 especies (Rocha *et al.* 2009). Su presencia en lagos salinos, como es el caso de Alchichica, es de menos de una decena de especies.

En su gran mayoría los isópodos se caracterizan por presentar morfologías muy diversas, pero todas de talla pequeña, alcanzan algunos milímetros de longitud; en el caso de la especie de Alchichica su talla se encuentra en un intervalo de 5 a 20 mm (Fig. 9.1). Solamente en el mar profundo se encuentran algunos ejemplares con tallas de casi 40 cm como el *Bathynomus giganteus*. Los machos de *Caecidotea williamsi* son menores (1.0-4.4 mm de longitud total) que las hembras (1.4-8.0 mm). Los organismos son color café o gris claro, ligeramente moteados.

A pesar de ello, los isópodos tienen en común un exoesqueleto, dos pares de antenas, ojos compuestos y cuatro juegos de partes bucales que incluyen mandíbulas. Su cuerpo (o pereión como se le conoce técnicamente) está segmentado, sus siete segmentos están equipados con patas caminadoras. El abdomen o pleón es más pequeño con seis segmentos o pleonitos, de los cuales los terminales se han fusionado para conformar la cauda o telson de la cual salen los urópodos. Las especies acuáticas, a diferencia de las especies terrestres, intercambian gases disueltos en el agua a través de los pleópodos que son estructuras birrá-

meas abdominales. En el caso de *Caecidotea williamsi* los pleópodos se caracterizan por tener mayor número de setas; con los pleópodos se apoyan también para nadar e impulsarse en el agua. La especie de Alchichica difiere de todas las demás especies en la región por la presencia o ausencia de microestructuras como son setas y espinas encontradas en diversas posiciones de las antenas, maxilas, pereiópodo, pleópodos, la forma de los urópodos que son elongados (alargados) y la forma única del apéndice reproductor del macho (Escobar-Briones y Alcocer 2002).

Este grupo de crustáceos no presenta fases de dispersión en su ciclo de vida. La hembra incuba a los huevecillos hasta su fase larvaria en un marsupio, con un cuidado parental extendido. Por lo anterior, las poblaciones de la especie *Caecidotea williamsi* en Alchichica están inevitablemente aisladas; su patrón de distribución está limitado al lago con una mayor abundancia en aguas someras. Su tasa de especiación es elevada pues contribuye a la alta diversidad de la región. Se ha mencionado que en ocasiones este tipo de invertebrados pueden dispersarse por aves, pero es un tema que requiere estudiarse más.

El papel de *Caecidotea williamsi* en Alchichica al igual que los isópodos en otros cuerpos de agua, tropicales y templados, es muy importante en el marco de facilitar la descomposición del material vegetal y animal vía mecánica ya que promueve la colonización microbiana. La dieta de *C. williamsi* se basa en el contenido gástrico en el cual se

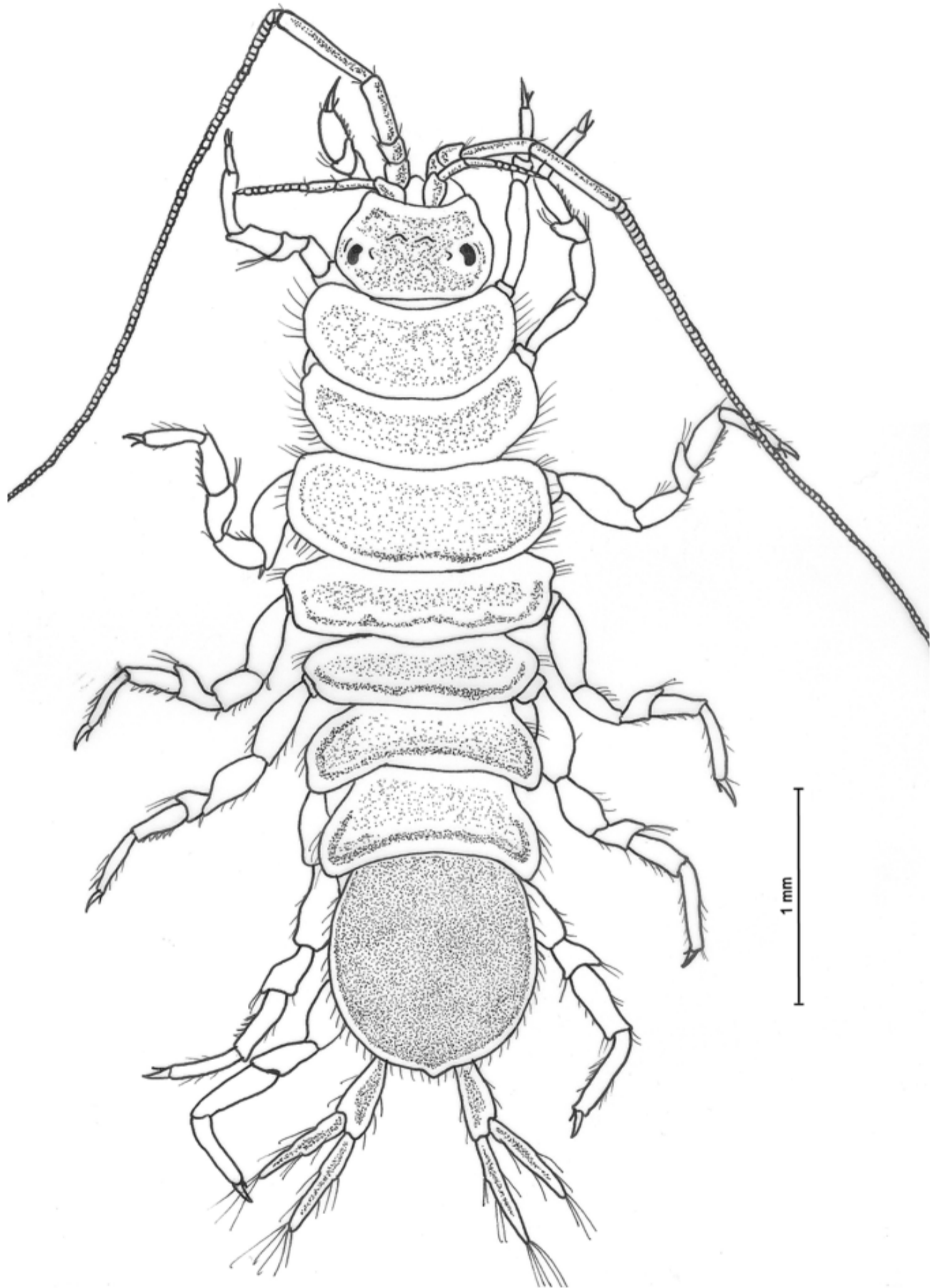


Figura 9.1. Diagrama de la especie endémica del isópodo *Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae) de Alchichica. (Dibujo: Esmeralda Morales Domínguez).

ha descrito colonias de bacterias, fragmentos de frústulas (pared celular dura y porosa impregnada de sílice que contiene a las diatomeas) de diatomeas y restos vegetales. Esta dieta se ha validado con valores de isotopía estable en el tejido del isópodo y ha sido comparada con la composición isotópica de diversos componentes en los ecosistemas del lago (Alcocer y Escobar-Briones 2007). No se descarta que esta dieta pueda cambiar a lo largo del año y en el gradiente de profundidad con la disponibilidad de componentes alimenticios con otros pequeños componentes de la fauna asociada en los microbialitos.

Hábitat

En el caso de Alchichica, *Caecidotea williamsi* vive de manera críptica en los espacios intersticiales de los microbialitos, en pequeñas “casitas” o “estuches” vacías de tricópteros (Fig. 9.2), esto es, insectos acuáticos que las elaboran con granos de arena, restos vegetales, valvas (conchas) de ostrácodos y, quienes se encuentran cementadas a los microbialitos, los cuales están recubiertos internamente por capas de bacterias filamentosas y microalgas del tipo de las diatomeas (Escobar-Briones y Alcocer 2002, Alcocer y Escobar-Briones 2007).

La asociación de esta especie con los microbialitos explica por qué nunca registraron la especie a pesar de que se llevaron a cabo muchos estudios para conocer el bentos (organismos asociados a los sedimentos

o fondo de cuerpos acuáticos) del lago, tanto en la zona litoral como en la profunda.

Interacciones biológicas

Los microbialitos donde habita *Caecidotea williamsi* también proveen refugio y alimento a un número elevado de otras especies de invertebrados que comparten hábitat con este isópodo. Entre los organismos con los cuales coexiste e interactúa están: larvas de insectos como los caballitos del diablo o libélulas *Enallagma praevarum*, *Aeshna dugesi*, hemípteros del género *Buenoa*, *Ambrysus* y *Krizousacorixa tolteca*, coleópteros del género *Donacia*, *Tropisternus*, *Berosus*, *Stenus*, *Hydroporus* y *Laccodytes*, dípteros del género *Tanytus* (*Ape-lopia*), *Micropsectra*, *Cryptochironomus*, *Stictochironomus*, *Paratanytarsus*, *Psectrocladius*, *Limnophyes* y especies *Labrudinia pilosela*, *Apedilum elachistus*, *Dicrotendipes neomodestus*, *Chironomus stigmaterus*, *Cricotopus isocladius triannulatus*, juveniles de tricópteros *Oecetis*, *Grensia*, *Oxyet-hira*, *Polycentropus*, anélidos como *Limnodrilus hoffmeisteri*, *Tubifex tubifex*, anfípodos de la especie *Hyaella azteca* y efemérotos como *Callibaetis montanus*.

Amenazas

Es importante tener presente que las clasificaciones científicas evolucionan con el conocimiento que se adquiere por parte de



Figura 9.2. *Caecidotea williamsi* —a la izquierda— y la “casita” o “estuche” vacía de tricóptero que ocupaba —a la derecha—. (Fotografía: Elva Escobar).

los investigadores expertos en cada grupo a lo largo del tiempo.

La sobre-extracción de agua subterránea, el crecimiento de la agricultura de riego y los desarrollos urbanos, la deforestación, así como el cambio climático han conllevado una disminución del nivel del agua del lago. Gran parte de los estromatolitos (ver capítulo *Los texcales*) que origi-

nalmente se formaron dentro del agua, actualmente están expuestos al ambiente aéreo y al efecto del sol, se han secado y se han quedado sin vida. La destrucción del hábitat donde vive *Caecidotea williamsi* resulta ser la mayor amenaza para esta y otras especies microendémicas.

Agradecimientos

La colecta de ejemplares para su estudio se financió a través de proyectos CONACYT y UNAM-PAPIIT. E. Morales realizó el diagrama que ilustra esta ficha.

Referencias

- Alcocer, J. & E. Escobar-Briones. 2007. On the ecology of *Caecidotea williamsi* Escobar-Briones & Alcocer (Crustacea: Isopoda: Asellidae) from Alchichica saline lake, Central Mexico. *Hydrobiologia* 576: 103-109.
- Brusca, R. C. & G. J. Brusca. 1990. Invertebrates. Sinauer Associates: Sunderland, MA (EE. UU.). ISBN 0-87893-098-1. 922 pp.
- Escobar-Briones, E. & J. Alcocer. 2002. *Caecidotea williamsi* (Crustacea: Isopoda: Asellidae), a new species from a saline crater-lake in the eastern Mexican Plateau. *Hydrobiologia* 477: 93-105.
- Martin, J. W., & G. E. Davis. 2001. An updated classification of the recent Crustacea. Science Series, 39. Natural History Museum of Los Angeles County. Los Angeles, CA (EE. UU.). 124 pp.
- Rocha-Ramírez, A., F. Álvarez, J. Alcocer, R. Chávez-López & E. Escobar-Briones. 2009. Lista anotada de los isópodos acuáticos epicontinentales de México (Crustacea: Isopoda). *Revista Mexicana de Biodiversidad* 80: 615-631.

Contacto

Elva Escobar. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ciencias del Mar y Limnología. Laboratorio de Biodiversidad y Macroecología. A.P. 70-305 Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.
escobri@cmarl.unam.mx

Javier Alcocer. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.





La conchilla

Sergio Cohuo

Ma. del Carmen Hernández

Liseth Pérez

Javier Alcocer

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Arthropoda
Clase: Ostracoda
Orden: Podocopida
Familia: Candonidae
Género: *Candona*
Especie: *Candona alchichica* (Cohuo, Hernández, Pérez y Alcocer 2017)
Nombre común: Conchilla u ostrácodo

Candona alchichica (Fig. 10.1) taxonómicamente pertenece al grupo de los ostrácodos, crustáceos microscópicos de entre 0.1 a 2 mm de longitud (Meisch 2000). El rasgo más característico de este grupo es su caparazón calcáreo compuesto de dos valvas que al cerrarse cubren todo el cuerpo y las extremidades del animal (Martens *et al.* 2008).

Los ostrácodos se usan frecuentemente en el estudio de contaminantes en los sistemas acuáticos (Ruiz *et al.* 2013) y en reconstrucciones paleoambientales como microfósiles. En este sentido, proporcionan evidencia de las condiciones climáticas del pasado a través de “especies indicadoras” (Horne *et al.* 2012) que son particularmente importantes para estimar cuan-

titativa y cualitativamente variaciones en la temperatura, conductividad del agua y alteraciones hidrológicas (Bridgwater *et al.* 1999, Palacios-Fest *et al.* 2002).

Candona alchichica es una de las dos especies de ostrácodos que habita el lago Alchichica. Actualmente se considera microendémica del sistema, porque su distribución se restringe exclusivamente a este lago. La segunda especie de ostrácodo en Alchichica es *Limnocytherina axalapasco*. Esta otra especie de ostrácodo se distribuye además en los lagos cercanos como Quechulac y La Preciosa, en la región conocida como Los Axalapazcos (Cohuo *et al.* 2014). Ambas especies aparentemente ocupan nichos ecológicos diferentes dentro del lago, *C. alchichica* es un ostrácodo

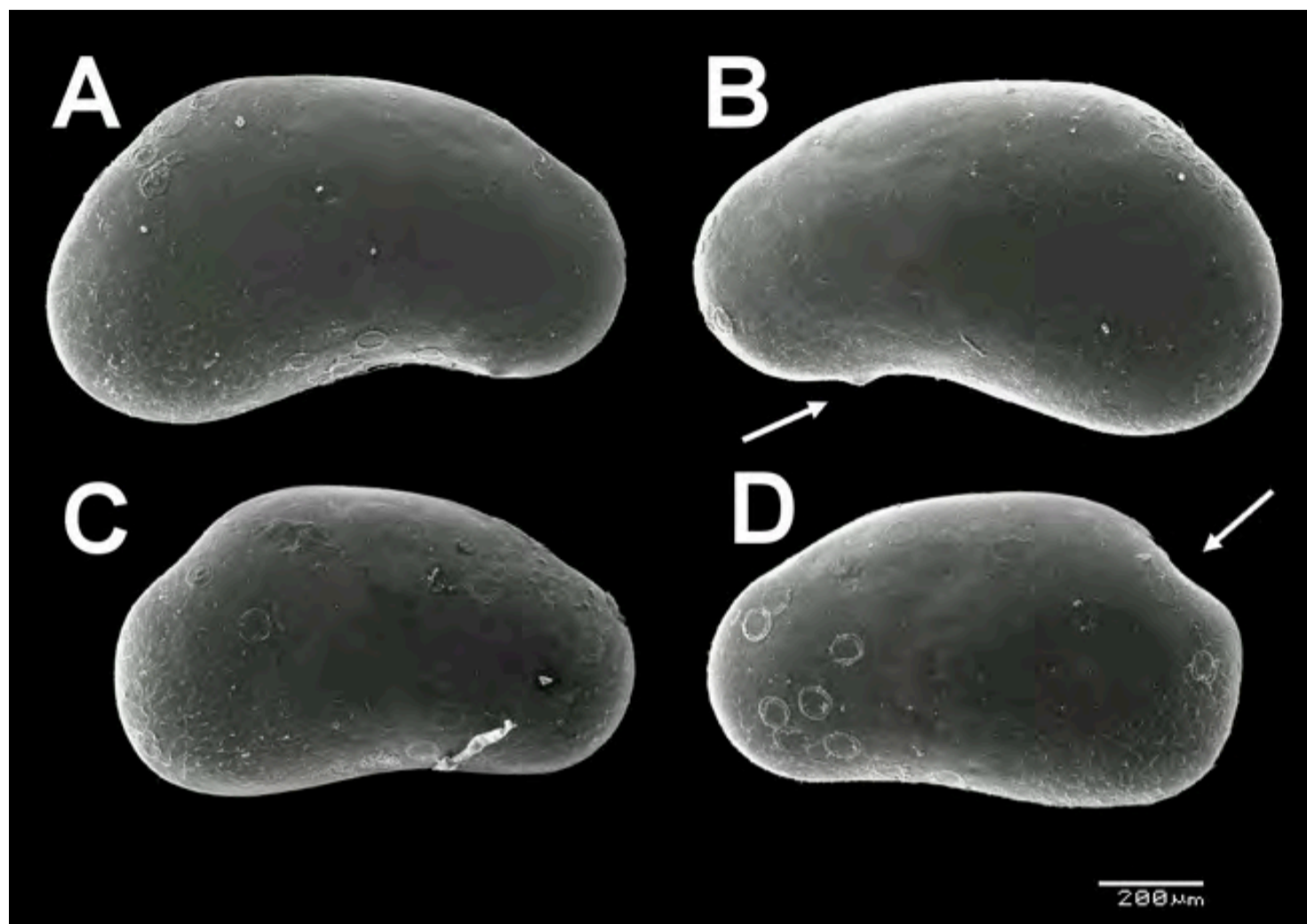


Figura 10.1. Fotografía de microscopio electrónico de barrido de *Candona alchichica*. A, B) macho; C, D) hembra. Las flechas blancas muestran las características morfológicas distintivas de ambas valvas: los machos con una proyección triangular en el margen antero-ventral y las hembras una depresión pronunciada en el margen postero-dorsal. (Fotografías: Ma. del Carmen Hernández).

que se encuentra asociado a los sedimentos, mientras que *L. axalapasco* es una especie que puede habitar tanto en los sedimentos como en la columna de agua (Cohuo *et al.* 2014).

Las valvas de *C. alchichica* son rectangulares (Fig. 10.1 y 10.2), de color blanco translúcido que permiten la revelación de las partes blandas en organismos vivos (Fig. 10.2 y 10.3). En algunos organismos las valvas pueden tener una ligera tonalidad café, que podría estar relacionada con el tipo de sedimento donde habitan. *Candona alchichica* se reproduce sexualmente y presenta dimorfismo sexual. Esto significa que los machos tienen diferencias mor-

fológicas bien definidas con relación a las hembras (Fig. 10.1-10.4).

Los machos son en general más grandes que las hembras, llegando a medir hasta 1.33 mm de longitud, siendo la media 1.23 ± 0.04 mm (n=20). Las hembras miden un máximo de 1.25 mm de longitud, siendo la media 1.17 ± 0.05 mm (n=20). Estas tallas posicionan a *C. alchichica* como uno de los ostrácodos más grandes de México.

Los machos de *C. alchichica* tienen las valvas ampliamente redondeadas en la región posterior, mientras que en la parte anterior las valvas están comprimidas y ligeramente proyectadas hacia abajo (Fig. 10.1

A, B, 10.2 A, C). Una de las características más distintivas en las valvas de los machos de *C. alchichica* es una pequeña proyección triangular en el margen anteroventral (Fig. 10.1 B, 10.2 A).

Las hembras tienen valvas aproximadamente igual de redondeadas en la parte anterior y posterior (Fig. 10.1 C, D, 10.2 B, D). La característica más distintiva en las valvas de las hembras es un margen dorsal muy irregular. En la región postero-dorsal de la valva, existe una depresión muy pronunciada (Fig. 10.1 D).

Las valvas en machos y hembras son lisas, aunque se puede apreciar pequeñas protuberancias dispersas de donde emergen setas (Fig. 10.2). Las valvas de *C. alchichica* no son simétricas con respecto al plano de unión, la valva izquierda es ligeramente más grande que la derecha por lo

que existe un ligero solapamiento en el margen anterior y posterior.

Candona alchichica presenta de ocho a diez pares de apéndices dependiendo del sexo. Los apéndices de los machos son (en orden de anterior a posterior) (Fig. 10.3): primeras antenas, segundas antenas, mandíbula, maxila, primer apéndice torácico, segundo apéndice torácico, tercer apéndice torácico, ramo caudal, hemipene y órgano eyaculador. Este último ocupa la mayor parte del cuerpo. En los machos, el endópodo de los primeros apéndices torácicos está modificado en ganchos que se usan para asir a la hembra durante la cópula (Fig. 10.3 G). Estos ganchos difieren en forma y tamaño en el organismo, siendo el gancho del apéndice derecho mayor y más robusto que el del izquierdo (Fig. 10.3 G).

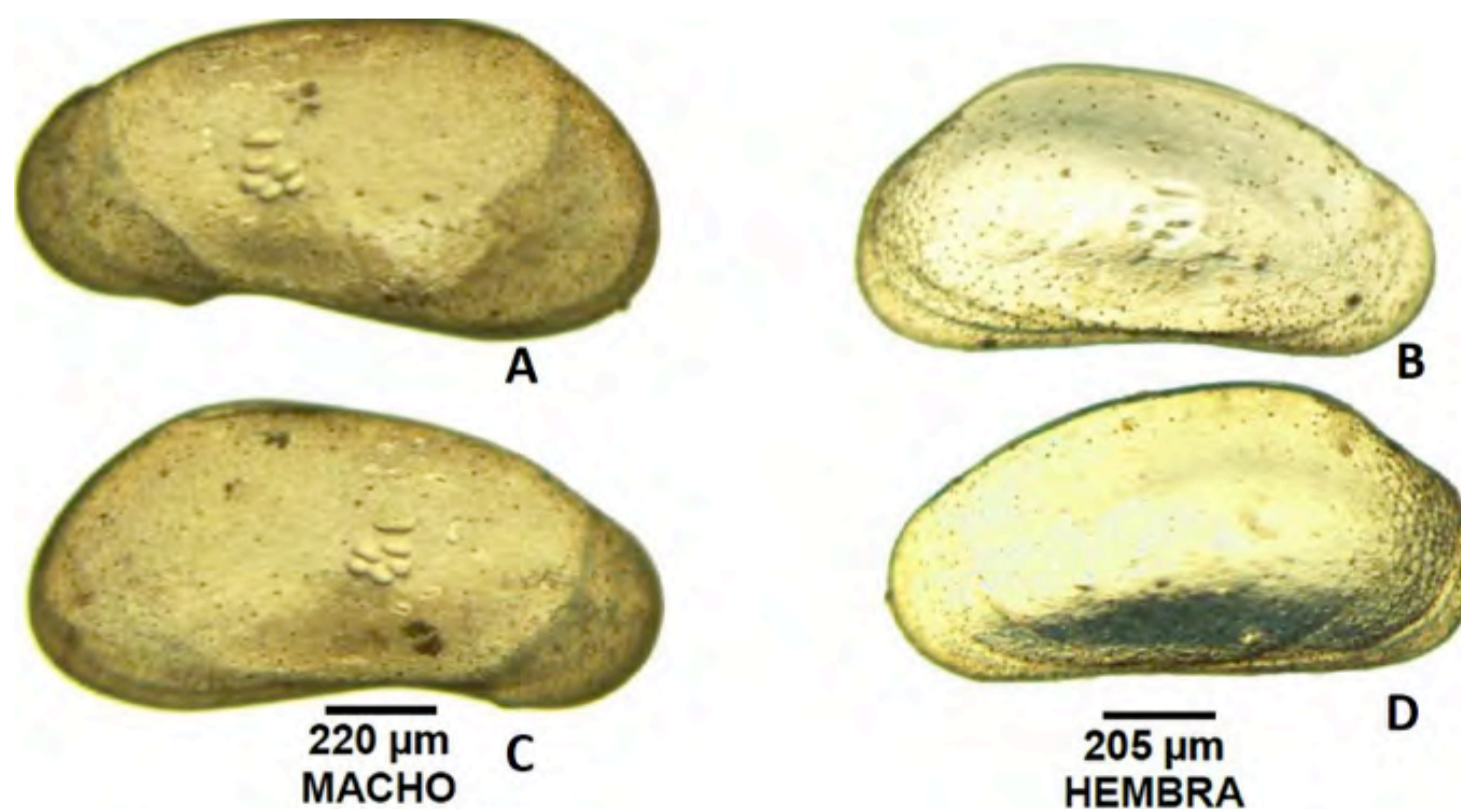


Figura 10.2. Fotografía a microscopio estereoscópico de las valvas de *Candona alchichica* macho y hembra. A, D) Valva izquierda, B, C) Valva derecha. (Fotografías: Narcis Prat).

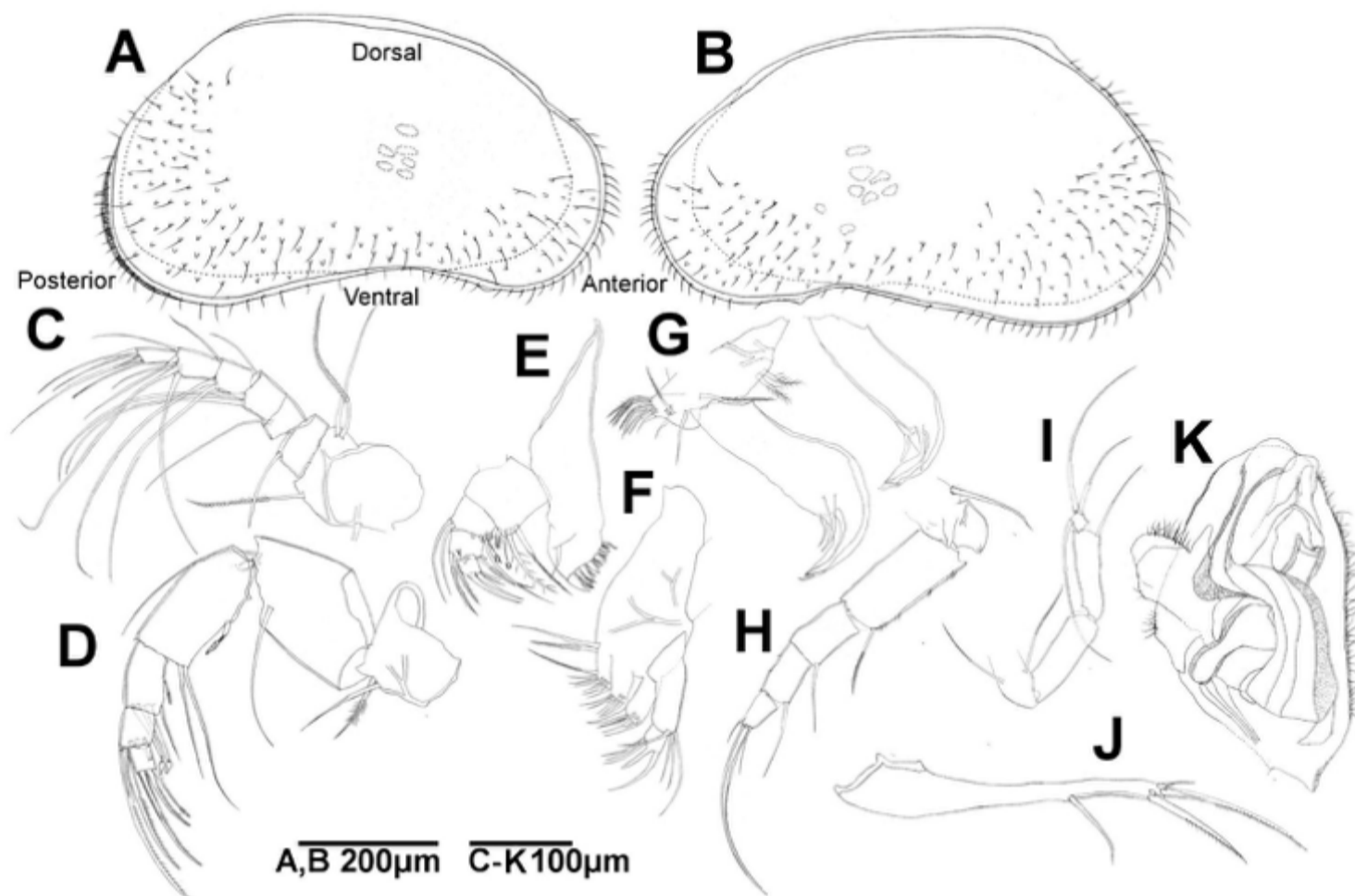


Figura 10.3. Esquema del ostrácodo *Candona alchichica* macho. A) valva derecha, B) valva izquierda, C) primera antena, D) segunda antena, E) mandíbula, F) maxila, G) primer apéndice torácico con endópodo modificado, H) segundo apéndice torácico, I) tercer apéndice torácico, J) ramo caudal, K) hemipene. (Ilustración: Paraskeva Michailova).

Las hembras presentan únicamente ocho pares de apéndices (Fig. 10.4). Las primeras antenas de *C. alchichica* están constituidas por setas alargadas y sensoriales que funcionan, entre otras cosas, para la locomoción y el tacto (Fig. 10.3 C, 10.4 C). Las segundas antenas están constituidas por garras que ayudan en la recolección de alimento.

Las segundas antenas de *C. alchichica* carecen de setas natatorias, lo que refleja los hábitos bentónicos de esta especie (Fig. 10.3 D, 10.4 D). En las segundas antenas los machos poseen dos estructuras sensoriales relacionadas con la detección de la hembra durante la reproducción (Fig. 10.3 D).

Las mandíbulas (Fig. 10.3 E, 10.4 E) y maxilas (Fig. 10.3 F, 10.4 F) son las estructuras encargadas de recolectar, seleccionar y masticar el alimento. Los principales apéndices locomotores de *C. alchichica* son los tres pares de apéndices torácicos y el ramo caudal (Fig. 10.3 G-J, 10.4 G-J). El hemipene de *C. alchichica* es único entre los ostrácodos porque puede presentar setas en su estructura (Fig. 10.3 K), lo que no es común en otras especies de ostrácodos.

Para *C. alchichica* se han reconocido nueve estadios de desarrollo; ocho estadios son larvarios (A-8 a A-1, siendo la larva A8 la forma más temprana, Fig. 10.5) y los organismos adultos (hembras y machos). Las

dimensiones de las valvas de los estadios A-4 a A-1 y la forma adulta se muestran en la Tabla 10.1. Las larvas más pequeñas a A-4 (A-5 a A-8), con dimensiones inferiores a 250 μm , no han podido ser medidas con precisión por la dificultad de su captura con métodos y herramientas estándar (mallas de 62 μm).

Relaciones filogenéticas de *Candona alchichica*

Candona alchichica es una especie que pertenece a la subfamilia Candoninae. Esta subfamilia es la segunda con mayor número de especies dentro los ostrácodos epicontinentales con más de 400 especies distribuidas a nivel mundial (Karanovic 2006, 2012). La mayoría de estas especies comparten características morfológicas entre ellas (por lo regular coincidentes con regiones geográficas), que permite inferir sus relaciones filogenéticas (Martens *et al.* 2008). *Candona alchichica* comparte características morfológicas con las especies norteamericanas *Candona tahoensis*, *Candona ohioensis* y *Candona patzcuaro* (Cohuo *et al.* 2016). Esta similitud morfológica sugiere que *C. alchichica* es una especie con afinidades norteamericanas.

Candona alchichica y *C. patzcuaro* son especies particularmente parecidas en cuanto a la morfología de valvas y apéndices. Ambas especies se distribuyen en el Altiplano Mexicano en lagos de donde toman sus nombres, el lago Alchichica y el lago Pátzcuaro (Tressler 1954), respecti-

vamente. Actualmente, no existe ningún trabajo filogenético de la subfamilia Candoninae en México, particularmente porque existen muy pocos representantes conocidos de este grupo en el país; sin embargo, la gran similitud de *C. alchichica* y *C. patzcuaro* y la independencia morfológica con otras especies de latitudes superiores podría sugerir una radiación independiente del grupo Candoninae en el Altiplano Mexicano.

Candona alchichica, estado de conservación

Candona alchichica es una especie que habita aproximadamente en el primer centímetro de la capa superior del sedimento; es una especie detritívora, que tiene preferencia por colonizar sedimento fino, oxigenado y contenido elevado de materia orgánica. Se sabe que algunas especies del género *Candona* se alimentan intensamente de fitodetrito superficial, especialmente de diatomeas planctónicas que se depositan en el sedimento, lo cual parece ser un importante vínculo bento-pelágico (Ólafsson *et al.* 1999). *Candona alchichica* por lo tanto

Tabla. 10.1. Rangos de talla para los estadios reconocidos de *C. alchichica*.

| Estadio | Talla (μm) |
|---------|-------------------------|
| A-4 | 250 - 460 |
| A-3 | 470 - 600 |
| A-2 | 640 - 800 |
| A-1 | 810 - 1000 |
| Adultos | 1000 - 1500 |

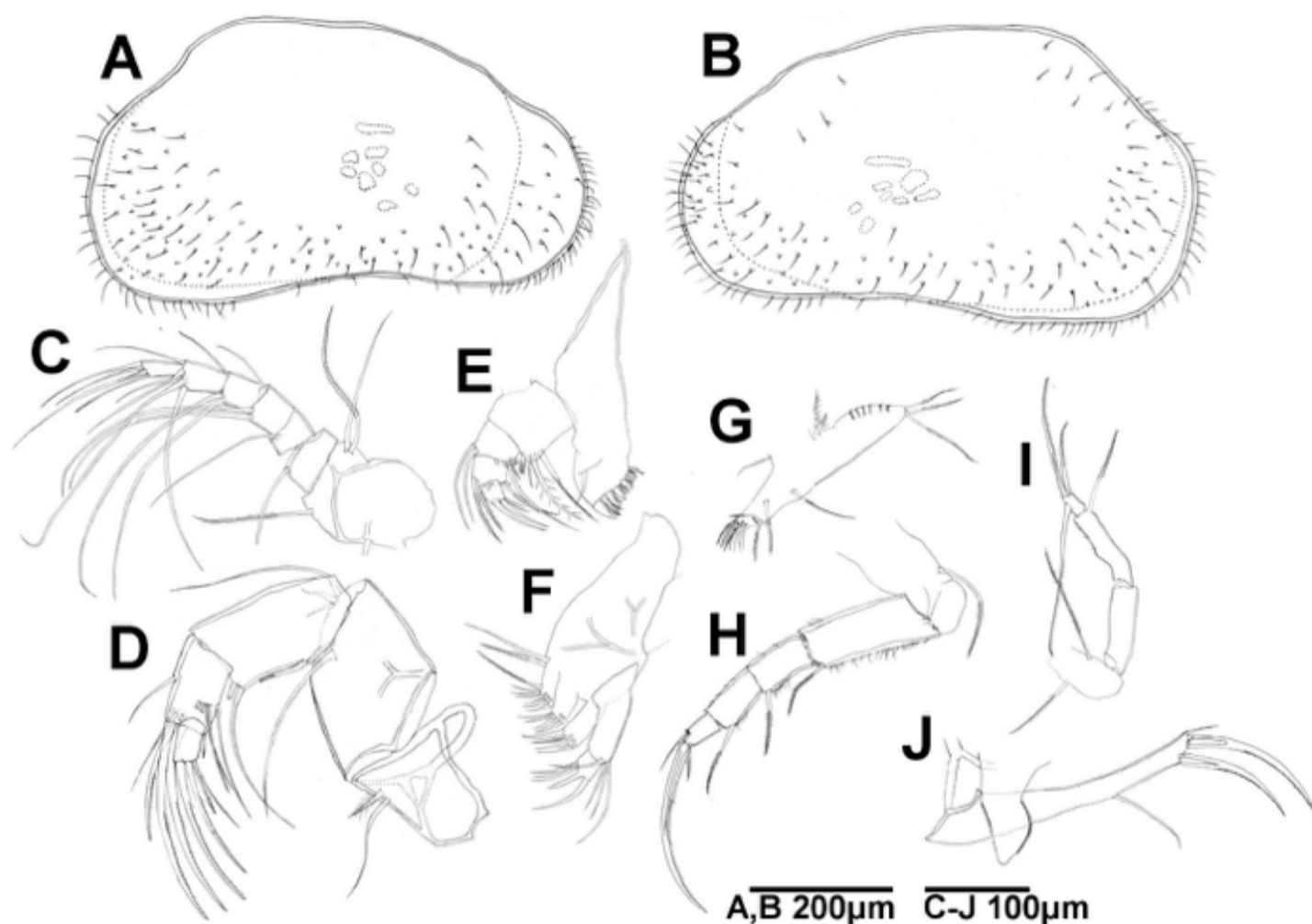


Figura 10.4. Esquema del ostrácodo *Candona alchichica* hembra. A) valva derecha, B) valva izquierda, C) primera antena, D) segunda antena, E) mandíbula, F) maxila, G) primer apéndice torácico, H) segundo apéndice torácico, I) tercer apéndice torácico, J) ramo caudal. (Ilustración: Paraskeva Michailova).

pertenece a los niveles inferiores de la cadena trófica y en consecuencia sirve también de alimento para insectos y peces en sus etapas larvarias o formas adultas. Debido a su abundancia elevada en los sedimentos litorales del lago Alchichica, *C. alchichica* puede considerarse un eslabón importante en la cadena trófica y por lo tanto en la transferencia de energía del sistema. Los cambios en las condiciones ambientales en el sedimento del lago (físicas o químicas), pueden afectar significativamente la abundancia de *C. alchichica* y por lo tanto afectar la estabilidad de las cadenas tróficas del sistema.

El estado de conservación de la especie por lo tanto está estrechamente ligada al estado de conservación del lago y el manejo de las zonas adyacentes que representan el hábitat de especies microendémicas como *C. alchichica*. La situación actual de su biología y ecología reflejan la capacidad que ha tenido la especie para colonizar la zona profunda del lago en caso de enfrentar situaciones adversas como anoxia en la zona profunda, como alternativa ante un descenso del nivel del lago y por lo tanto una pérdida de zona litoral.

Hábitat y distribución en el lago

Candona alchichica es una especie bentónica que en condiciones favorables/óptimas se mantiene activa desplazándose en la superficie del sedimento con las valvas ligeramente abiertas (Fig. 10.6).

Se distribuye en parches en todo el sistema, con mayor densidad en la zona litoral con $8,987 \pm 10,284$ ind m^{-2} (Hernández *et al.* 2010), la cual disminuye considerablemente en la zona profunda del lago con $1,169 \pm 1,970$ ind m^{-2} (Hernández *et al.* 2014).

Destaca la habilidad que ha tenido esta especie para colonizar la zona profunda, que se torna anóxica por un periodo prolongado (ver capítulo *El cuerpo de agua*). En esta zona la población permanece activa durante el periodo de circulación y tiene la capacidad de entrar en un estado de latencia en estadio juvenil (A-2) o bien formar huevos de resistencia ante las condiciones desfavorables que se generan (anoxia y presencia de H_2S) durante la estratificación.

La recuperación de condiciones favorables durante el siguiente periodo de mezcla del lago, nuevamente con presencia de oxígeno disuelto, permite que las larvas se reactiven y/o que huevos de resistencia eclosionen. El entrar en latencia y/o depositar huevos de resistencia y eclosionar cuando hay condiciones favorables para recolonizar el hábitat es una ventaja que tienen los ostrácodos respecto al resto de los invertebrados bentónicos (Dole-Olivier *et al.* 2000).

La especialización ecológica que ha tenido el grupo ha requerido morfologías mejor equipadas para la explotación más eficiente de ciertos microhábitats (Sánchez-González *et al.* 2004). El género *Candona* ha sido registrado en sistemas lacustres de todo el mundo, se considera por tanto un grupo euritópico (de amplia distribución geográfica), se ha reportado en lagos con agua diluida con concentraciones de bicarbonato ligeramente altas (Smith 1993), en lagos salinos de América y Europa (De Deckker 1981, Kiss 2007), con especies que

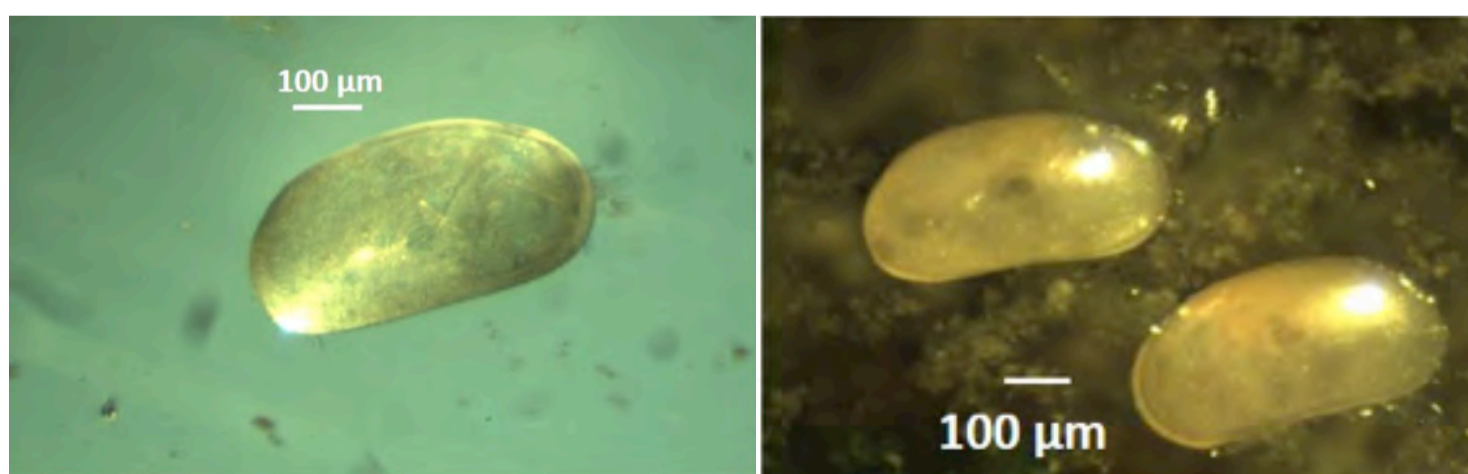


Figura 10.5. Fotografías a microscopio estereoscópico de organismos juveniles vivos (con valvas cerradas) de *Candona alchichica*. (Fotografías: Ma. del Carmen Hernández).



Figura 10.6. Fotografía a microscopio estereoscópico de un organismo vivo de *Candona alchichica*. (Fotografía: Ma. del Carmen Hernández).

han mostrado preferencias y tolerancias ecológicas diferentes.

Agradecimientos

Rose A. Gulledge del Smithsonian Institution-NMNH por su apoyo y las fotografías del ejemplar tipo de *C. patzcuaro*, a la M. en C. Berenit Mendoza Garfias del Laboratorio de Microscopía y Fotografía de Biodiversidad, Instituto de Biología, UNAM, México, y a Anais Cisneros y Fernanda Charqueño por el apoyo en la obtención de las fotografías al MEB. Por el apoyo financiero al Consejo

Nacional de Ciencia y Tecnología (167621, 103332, 190519), DGAPA-PAPIIT (IN215512), FES Iztacala PAPCA (2013-14), National Science Foundation (0902864) y al Instituto de Geología, UNAM. Finalmente al CONACYT por las becas otorgadas a SC y MCH.

Referencias

Bridgwater N., T. Heaton & S. O'Hara. 1999. A late Holocene paleolimnological record from central Mexico, based on faunal and stable-isotope analysis of ostracod

- shells. *Journal of Paleolimnology* 22: 383-397.
- Cohuo-Duran S., L. Perez & I. Karanovic. 2014. On *Limnocytherina axalapasco*, a new freshwater ostracod (Podocopida: Limnocytheridae) from Mexican crater lakes. *Revista de Biología Tropical* 62: 15-32.
- Cohuo S., M. Hernández, L. Pérez & J. Alcocer. 2017. *Candona alchichica* (Podocopida: Candonidae), a new ostracod species from saline, tropical Lake Alchichica, Mexico. *Journal of Limnology* 76: 68-84.
- De Deckker P. 1981. Ostracods of athalassic saline lakes. *Hydrobiologia* 81: 131-144.
- Dole-Olivier M., D. Galassi, P. Marmonier & M. Châtelliers. 2000. The biology and ecology of lotic microcrustaceans. *Freshwater Biology* 44: 63-91.
- Hernández M. C., E. Escobar & J. Alcocer. 2010. Ensemble de crustáceos bentónicos en un lago salino tropical. *Revista Mexicana de Biodiversidad* 81: 133-140.
- Hernández M. C., J. Alcocer, L. A. Oseguera & E. Escobar. 2014. Profundal benthic invertebrates in an oligotrophic tropical lake: different strategies for coping with anoxia. *Journal of Limnology* 73: 387-399.
- Horne D. J., A. A. Holmes, J. Rodriguez-Lazaro & F. A. Viehberg. 2012. Ostracoda as proxies for quaternary climate change. En Jaap J. M., van der Meer (Eds.). *Developments in Quaternary Science*, vol. 17. Elsevier, pp. 1-337.
- Karanovic I. 2006. Recent Candoninae (Crustacea, Ostracoda) of North America. Records of Western Australian Museum. Supplement No. 71.
- Karanovic I. 2012. Recent freshwater ostracods of the world. Crustacea, Ostracoda, Podocopida. Springer, Berlin Heidelberg: 608 pp.
- Kiss A. 2007. Factors affecting spatial and temporal distribution of Ostracoda assemblages in different macrophyte habitats of a shallow lake (Lake Fehér, Hungary). *Hydrobiologia* 585: 89-98.
- Martens K., I. Schön, C. Meisch & D. Horne. 2008. Global diversity of ostracods (Ostracoda, Crustacea) in freshwater. *Hydrobiologia* 595:185-193.
- Meisch C. 2000. Freshwater Ostracoda of Western and Central Europe. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, Berlin: 522 p.
- Ólafsson E., H. Modig & W. Van de Bund. 1999. Species specific uptake of radio-labelled phytodetritus by benthic meiofauna from the Baltic Sea. *Marine Ecology Progress Series* 117: 63-72.
- Palacios-Fest M., A. L. Carreño, J. Ortega-Ramírez, & G. Alvarado-Valdez. 2002. A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babícora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry. *Journal of Paleolimnology* 27: 185-206.
- Ruiz, F., M. Abad, A. M. Bodergat, P. Carbonel, J. Rodríguez-Lázaro, M. L. González-Regalado, A. Toscano, E. X. García & J. Prenda. 2013. Freshwater Ostracods as Environmental Tracers. *International Journal of Environmental Science and Technology* 10: 1115-1128.
- Sánchez-González J., A. Baltanás & D. Danielopol. 2004. Patterns of morphospace occupation in recent Cypridoidea (Crustacea, Ostracoda). *Revista Española de Micropaleontología* 36: 13-27.
- Smith A. 1993. Lacustrine ostracodes as hydrochemical indicators in lakes of the north-central United States. *Journal of Paleolimnology* 8: 121-134.
- Tressler W. 1954. Fresh-water Ostracoda from Texas and Mexico. *Journal of Washington Academy of Science* 44:138-149.

Contacto

Sergio Cohuo. Tecnológico Nacional de México/ I. T. de Chetumal. Av. Insurgentes 330, Chetumal, 77013 Quintana Roo, México. sergiocd@comunidad.unam.mx

Ma. del Carmen Hernández. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, CP 04510, Ciudad de México, México.

Liseth Pérez. Institut für Geosysteme und Bioindikation, Technische Universität Braunschweig, Langer Kamp 19c, 38106, Braunschweig, Alemania.

Javier Alcocer. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.





El gusano de sangre

Raúl Acosta

Narcís Prat

Carles Ribera

Paraskeva Michailova

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Arthropoda
Clase: Insecta
Orden: Diptera
Familia: Chironomidae
Género: *Chironomus*
Especie: *Chironomus alchichica* (Acosta y Prat 2017)
Nombre común: Gusano de sangre o gusano rojo

Descripción de la especie

Larva de 9-10 mm de longitud con un par de túbulos cortos posterolaterales acodados y dos pares de túbulos ventrales largos en el séptimo y octavo segmento abdominal respectivamente. La coloración de larva viva es rojo brillante, pero cuando se conserva en alcohol cambia a marrón claro (Fig. 11.1). Cabeza marrón clara o amarillenta con la región ventral ligeramente más oscura. Borde occipital oscuro (Fig. 11.2). Mentum con los dientes oscuros y el diente central trifido. Cuarto diente lateral más pequeño que el tercero (Fig. 11.2 A). Mandíbula con un diente dorsal (2) y tres dientes ventrales (3, 4 y 5) (Fig. 11.2 B). Antenas cortas de cinco segmentos. Una vez

completado el desarrollo larval se produce la metamorfosis, la larva pasa al estado de pupa. Después, a partir de las pupas emergen los adultos alados de vida aérea,



Figura 11.1. Larva conservada de *Chironomus alchichica*.

dejando las exuvias o pieles de la pupa (Fig. 11.2 C). Los adultos son relativamente pequeños (4-5 mm de longitud) (Fig. 11.2 D).

Con coloración general del cuerpo marrón oscuro a claro con las patas notoriamente más claras. Solo se distingue de otras especies del mismo género por la morfología de la genitalia masculina, con la punta anal triangular y que termina en una punta recurvada (Acosta *et al.* 2017) (Fig. 11.2 E).

Hábitat

Las larvas y pupas son acuáticas y habitan desde el litoral hasta las zonas profundas del lago Alchichica (60 m). Las larvas usualmente viven en sustratos arenosos, ricos en detritos orgánicos, que representan su principal fuente de alimento.

Mientras en las zonas litorales se les puede encontrar a lo largo de todo el año asociadas a algas y macrófitas, en las zonas profundas se les encuentra únicamente entre enero y mayo, que representa el período de circulación y mezcla en el lago.



Figura 11.2. Cabeza de larva de *Chironomus alchi-*

Pueden soportar un amplio rango de condiciones ambientales, incluidas bajas concentraciones de oxígeno disuelto en el agua. La presencia de hemoglobina les permite almacenar oxígeno y es responsable de su típica coloración rojo sangre. Los adultos alados, normalmente viven pocos días y se les encuentra en las orillas del lago. Comparte hábitat con otros invertebrados como el anfípodo *Hyaella azteca* y el oligoqueto *Limnodrilus hoffmeisteri* (Alcocer *et al.* 2016).

Importancia

Debido a su tipo de alimentación y a las altas densidades poblacionales que suelen presentar, las larvas de *Chironomus* representan un rol muy importante en el procesamiento y reciclaje de detritos orgánicos en el lago y son fuente de alimento para diversos organismos predadores (Pfenniger *et al.* 2007). Asimismo, pueden ser usados como indicadores biológicos de la calidad del agua y en estudios paleoecológicos (Brooks *et al.* 2008).

Distribución

Esta especie, recientemente descrita, actualmente está considerada como endémica del lago Alchichica, por lo que su distribución está restringida a este ambiente.

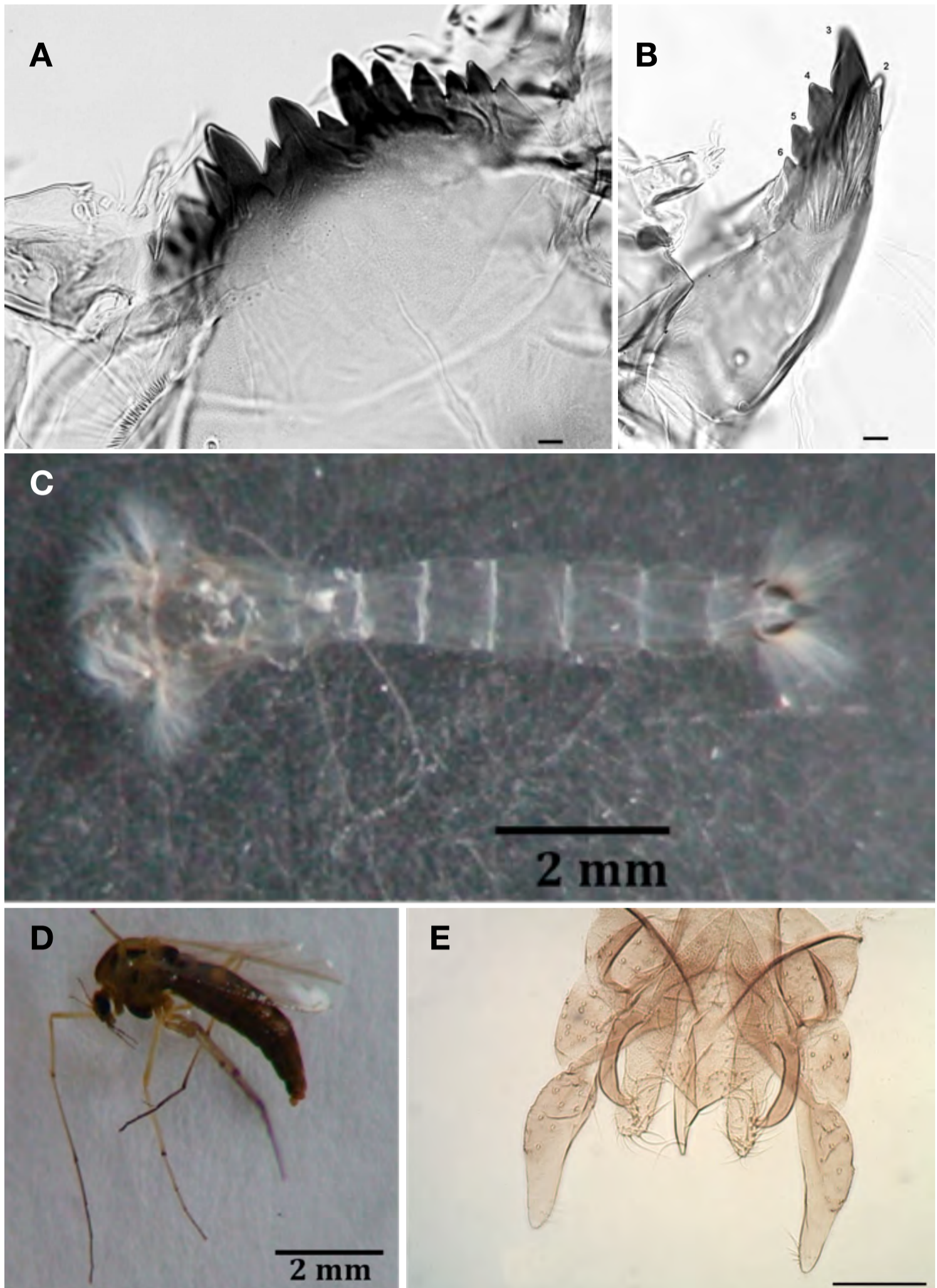


Figura 11.2. A) Detalle del mentum de larva de *Chironomus alchichica*. Barra=100 μm; B) Detalle de la mandíbula de *Chironomus alchichica*. Barra = 100 μm; C) Exuvia pupal de *Chironomus alchichica*; D) Adulto hembra de *Chironomus alchichica*; E) Genitalia masculina de *Chironomus alchichica*. Barra= 50 μm.

Agradecimientos

A Pau Fortuño por su ayuda en los trabajos de edición. A María Rieradevall que fue la que propicio el trabajo con nuestra estancia en México en 2011.

Referencias

- Acosta R., N. Prat, C. Ribera, P. Michailova, M. C. Hernández-Fonseca & J. Alcocer. 2017. *Chironomus alchichica* sp. n. (Diptera: Chironomidae) from Lake Alchichica, Mexico. *Zootaxa* 4365: 053-070.
- Alcocer J. E. Escobar, P. Řezníčková & L. Oseguera. 2016. La comunidad de macroinvertebrados bentónicos litorales como un reflejo de la heterogeneidad ambiental. The littoral benthic macroinvertebrate community as a reflection of environmental heterogeneity. *Hidrobiológica* 26: 403-418.
- Brooks S. J., P. G. Langdon & O. Heiri. 2008. The identification and use of Palearctic Chironomidae larvae in palaeoecology. QRA Technical Guide No. 10. *Journal of Paleolimnology* 40: 751-753.
- Pfenninger M., C. Nowak, C. Kley, D. Steinke & B. Streit. 2007. Utility of DNA taxonomy and barcoding for the inference of larval community structure in morphologically cryptic *Chironomus* (Diptera) species. *Molecular Ecology* 16: 1957-1968.

Contacto

Raúl Acosta. Freshwater Ecology and Management Research Group. Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia i Medi Ambient. Universitat de Barcelona. Av. Diagonal, 643. 08028 Barcelona, España.
racosta@ub.edu

Narcís Prat. Freshwater Ecology and Management Research Group. Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia i Medi Ambient. Universitat de Barcelona. Av. Diagonal, 643. 08028 Barcelona, España.

Carles Ribera. Institut de Recerca de la Biodiversitat (IRbio). Departament de Biologia Evolutiva, Ecologia i Ciències Ambientals. Universitat de Barcelona, Av. Diagonal, 643, 08028 Barcelona, España.

Paraskeva Michailova. Institute of Biodiversity and Ecosystem Research, Bulgarian Academy of Sciences, Blvd. Tzar Osvoboditel 1, Sofia 1000, Bulgaria.





El copépodo harpacticoide

Omar A. Barrera-Moreno

Eduardo Suárez-Morales

Jorge Ciro-Pérez

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Arthropoda
Clase: Hexanauplia
Orden: Harpacticoida
Familia: Canthocamptidae
Género: *Cletocamptus*
Especie: *Cletocamptus gomezi* (Suárez-Morales, Barrera-Moreno y Ciro-Pérez 2013)
Nombre común: Copépodo harpacticoide

Entre otros grupos de invertebrados, los copépodos, cladóceros y rotíferos son parte importante de la fauna que conforma al plancton y bentos que se encuentra en los cuerpos de agua epicontinentales (Suárez-Morales *et al.* 1996). Por su tamaño, una gran cantidad de taxones de copépodos son considerados como microcrustáceos, esto debido a que su talla varía entre los 0.3 y 2.0 mm. A pesar de tener origen marino, los copépodos han mostrado una gran capacidad de colonización y adaptación en diferentes entornos con condiciones ecológicas contrastantes (Elías-Gutiérrez *et al.* 2008, Barrera-Moreno *et al.* 2015).

Tales características han contribuido a su elevada diversificación taxonómica, contabilizada hasta ahora en cerca de 12,000

especies, las cuales tienen hábitos de vida libre en ríos, presas, lagos, lagunas y todo tipo de humedales, así como en sistemas semiterrestres; han colonizado exitosamente distintos tipos de sedimentos, suelos orgánicos, plantas litorales y plantas epífitas. En cada ambiente acuático, estos crustáceos tienen un papel fundamental dentro de las redes tróficas, pues muchos de ellos actúan como consumidores primarios y como alimento de otros organismos de mayor tamaño, vinculando así a los niveles tróficos inferiores con los superiores (Reid y Williamson 2010).

Entre los órdenes de copépodos epicontinentales (*i.e.*, Calanoida, Cyclopoida, Harpacticoida y Gelyelloida), los harpacticoides son los menos estudiados (Suárez-

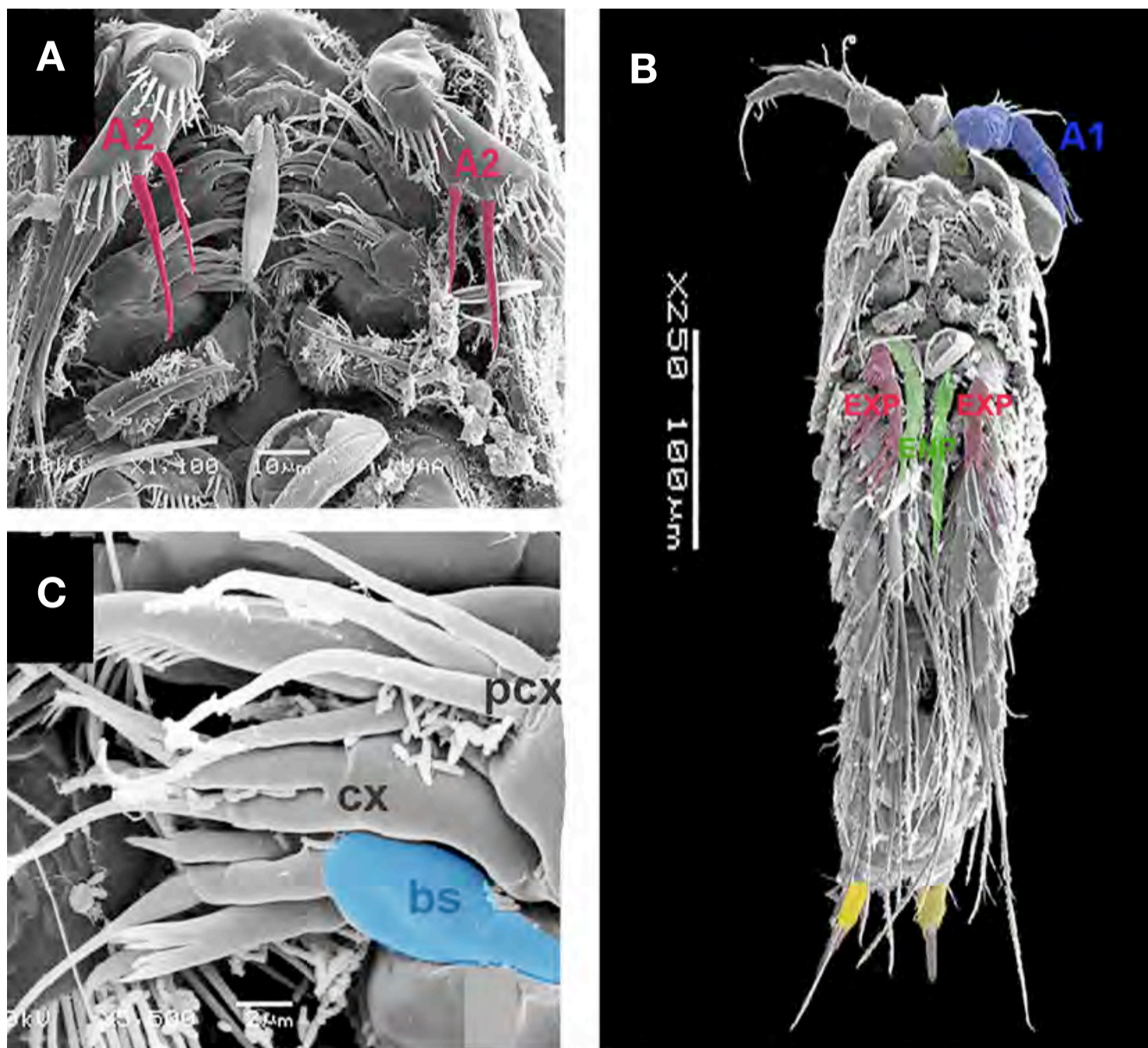


Figura 12.1. Análisis de microscopía electrónica de barrido de una hembra adulta de *C. gomezi* del lago Alchichica, Puebla. A) partes bucales, vista ventral, se destacan en color rosa las dos setas internas del último segmento de la antena (A2); B) hembra adulta, vista ventral del cuerpo; se destaca en color verde el endopodito de la pata 1, más largo que el exopodito (en color rosa); C) detalle de los segmentos de la maxila, vista ventral; se destaca el segmento basipodal (bs) y los segmentos adyacentes, precoxal (pcx) y coxa (cx). (Fotografías: Eduardo Suárez-Morales).

Morales *et al.* 2013). Este grupo de organismos es uno de los más diversos e interesantes, y está representado por cerca de 4,300 especies agrupadas en más de 57 familias y 467 géneros que generalmente viven como parte de la comunidad del meiobentos, la cual incluye a los organismos con una talla entre 63-500 µm que habitan los fondos y sedimentos de los ambientes acuáticos. Al-

gunas especies de harpacticoides sobreviven en ambientes extremos, como pozas de hielo en los Himalayas, aguas termales a más de 45°C y sistemas hipersalinos, con salinidades de más de 150 g L⁻¹ cuatro veces más concentrado que el agua marina, que resultan incompatibles con otras formas de vida acuática. También se han encontrado harpacticoides en otros sustratos

no menos sorprendentes como el caparazón de tortugas marinas e incluso en la piel del manatí caribeño (Suárez-Morales 2007).

Los miembros de la familia Canthocamptidae incluyen a 35 géneros y 627 especies, incluyendo *Attheyella* y *Elaphoidella*, ambos muy diversos y con amplia distribución, así como el género *Cletocamptus*, de la familia Canthocamptidae cuyas especies generalmente habitan en ambientes costeros y estuarinos. Las especies de esta familia son, en general, de hábitos bentónicos (habitan en los fondos de los cuerpos de agua) y se alimentan de microalgas, hongos, protozoarios, bacterias y del detritus que obtienen al rascar el sustrato con sus apéndices bucales (Suárez-Morales 2015). Si bien, la mayor proporción de sus especies se distribuyen en la región Paleártica (que comprende Europa, el norte de África y de la península arábiga, así como Asia al norte del Himalaya), cerca del 73% de las 109 que se distribuyen en la región Neotropical (que abarca parte de Estados Unidos y México hasta Sudamérica) son endémicas a la zona (Suárez-Morales 2015), por lo que no se encuentran distribuidas en otras regiones.

Por otro lado, el estudio de la morfología y taxonomía de los harpacticóides de aguas continentales es una tarea compleja y minuciosa debido a su talla y a la estrecha similitud entre varias de las especies (Gómez y Gee 2009). Ello ha motivado a los especialistas a explorar microcaracteres para distinguir las especies de manera confiable. Aunado a lo anterior, es posible pensar que, con estos organismos sucede

lo mismo que con otros invertebrados “poco carismáticos”, que actualmente no son suficientemente estudiados a causa de la falta de especialistas, y a lo complicado que puede resultar el efectuar un análisis morfológico-comparativo detallado, así como las investigaciones que toman en cuenta las características genéticas, reproductivas o ecofisiológicas. Esto permite, por un lado, suponer que el esfuerzo de muestreo generado hasta ahora no ha sido el suficiente para conocer realmente la biodiversidad de muchos cuerpos de agua en diferentes regiones; y por otro, que es posible que muchas especies se encuentren formando complejos crípticos, esto es, un conjunto de taxones cercanos, pero difícilmente distinguibles mediante análisis morfológicos. De esta manera, se tendría la presencia de especies muy similares morfológicamente, pero adaptadas a condiciones particulares, por ejemplo, de salinidad, como es común en invertebrados acuáticos en general (Knowlton 1993, Leasi *et al.* 2013), y particularmente en copépodos (Gutiérrez-Aguirre *et al.* 2013, Barrera-Moreno *et al.* 2015). Conocer esta situación ayudaría a aclarar cuestiones importantes en temas evolutivos, ecológicos y biogeográficos, ya que taxones que se consideran con amplia distribución o con adaptaciones a diferentes condiciones ambientales y presiones de selección, en realidad podrían ser especies con distribuciones y tolerancias restringidas, y en algunos casos taxones endémicos.

Como es común en la taxonomía de los harpacticóides, las relaciones filogenéticas

entre las especies que componen el género *Cletocamptus* parecen ser complejas e inconsistentes. Debido a las dificultades que conllevan los estudios basados sólo en la morfología y a las modificaciones en los criterios taxonómicos, se pueden observar varios cambios en la identidad de sus especies y hasta del género mismo a lo largo de la historia (Mielke 2000). Además, es muy posible que en el género existan complejos de especies crípticas que no pueden distinguirse fácilmente sólo con la morfología comparada, como parece suceder con *C. deitersi*, considerada cosmopolita posiblemente de manera errónea (Suárez-Morales *et al.* 2013) ya que presenta un alto grado de variación en su fenotipo dentro y entre sus poblaciones reconocidas (Fleeger 1980), lo que ha llevado a varios investigadores a pensar que bajo ese nombre existen distintas especies que han sido registradas en distintas zonas geográficas como *C. deitersi* (Gómez *et al.* 2003).

De las 24 especies válidas que forman parte del género *Cletocamptus*, en México, se tienen registradas solo dos: *C. sinaloensis* (Gómez *et al.* 2004) y *C. gomezi*. La primera se distribuye en varias lagunas costeras y estuarios en Sinaloa, así como en un cenote en Yucatán (Suárez-Morales *et al.* 2013), mientras que la segunda ha sido registrada exclusivamente en Alchichica.

Sobre el origen de ambos taxones, se estima que, si bien este género es originalmente marino, algunos linajes han tenido la capacidad de colonizar aguas epicontinentales, dulces y salinas, gracias a la disper-

sión pasiva de individuos o de estructuras de resistencia (Suárez-Morales *et al.* 1996) por medio de aves acuáticas (por ejemplo, *Aythya affinis*, *Oxyura jamaicensis*, *Podiceps nigricollis*, *Calidris minutilla* y *Fulica americana*, en el caso de *C. gomezi*), las cuales pudieron transportar a los organismos desde ambientes costeros cercanos (Alcocer *et al.* 2015) o desde otros lagos salinos.

Si esta hipótesis es cierta, se puede pensar que, al llegar a estos ambientes nuevos, algunos organismos con una combinación particular en su información genética o genotipos tuvieron la capacidad de soportar el cambio en las presiones de selección respecto las condiciones marinas, sobre todo a la salinidad, por lo que estos linajes pudieron continuar con un proceso de divergencia y eventualmente de especiación. Por otra parte, la localización de Alchichica, a más de 100 km de la costa y a 2,335 m s.n.m., así como el aislamiento del lago de otros ambientes con condiciones limnológicas e hidrológicas similares, además que se ha verificado su ausencia en los lagos cercanos, sugieren que *C. gomezi* es microendémico del litoral de este lago, lo que significa que no habita en ningún otro hábitat dentro de Alchichica, y menos en algún sitio distinto del mundo (Suárez-Morales *et al.* 2013).

De esta manera, al analizar los caracteres morfológicos de los copépodos harpacticoides recolectados en ambientes litorales de Alchichica, se puede decir que pertenecen al género *Cletocamptus* por poseer, entre otras características: 1) cuerpo cilíndrico, 2)

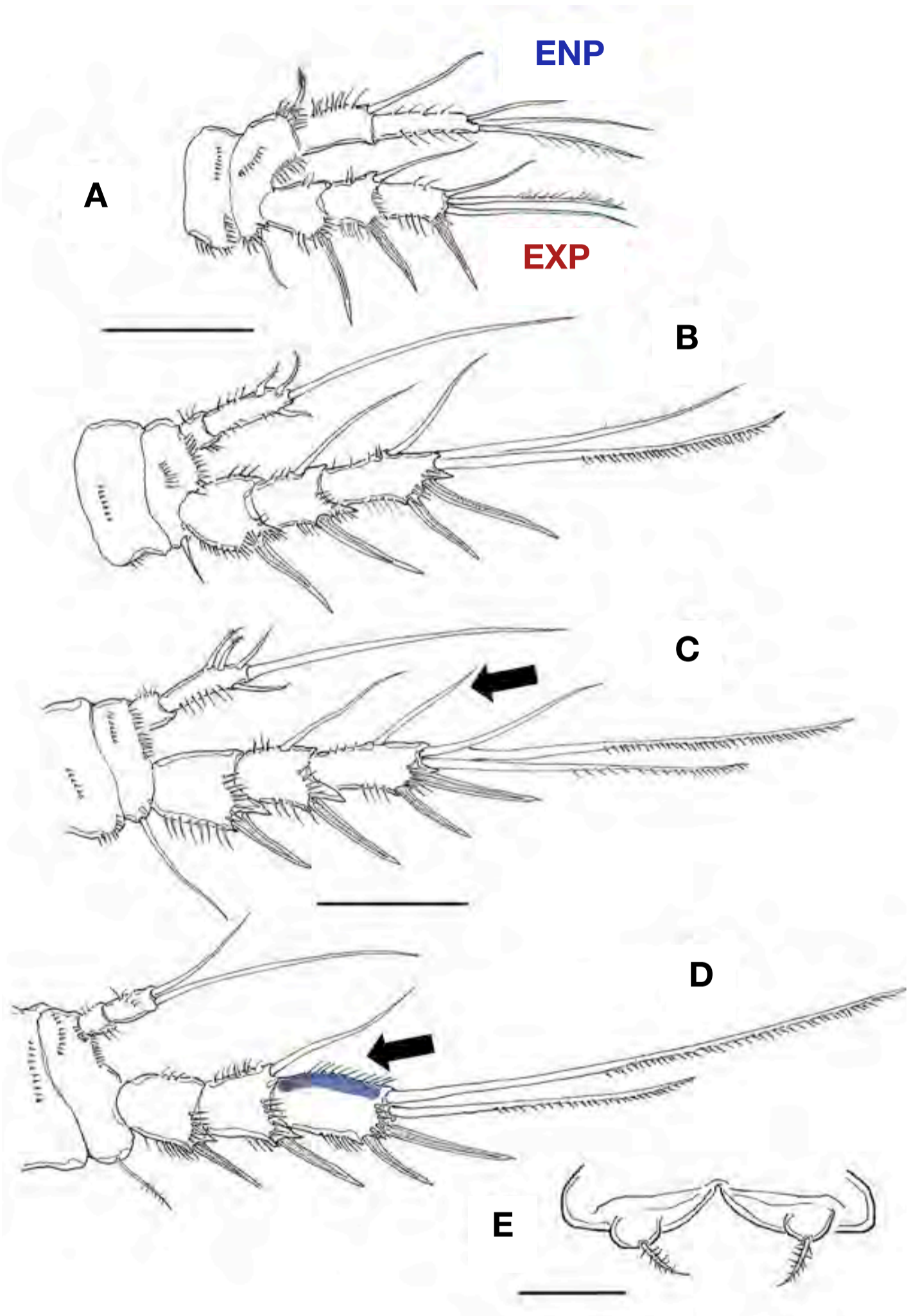


Figura 12.2. Dibujos de apéndices de una hembra de *C. gomezi* del lago Alchichica, Puebla, México. A) pata 1 mostrando la rama endopodal (ENP) y exopodal (EXP); B) pata 2; C) pata 3, la flecha señala la presencia de una seta interna en este segmento; D) pata 4, la flecha señala la ausencia de setas internas en el tercer segmento; E) pata 6. (Dibujos: Eduardo Suárez-Morales).

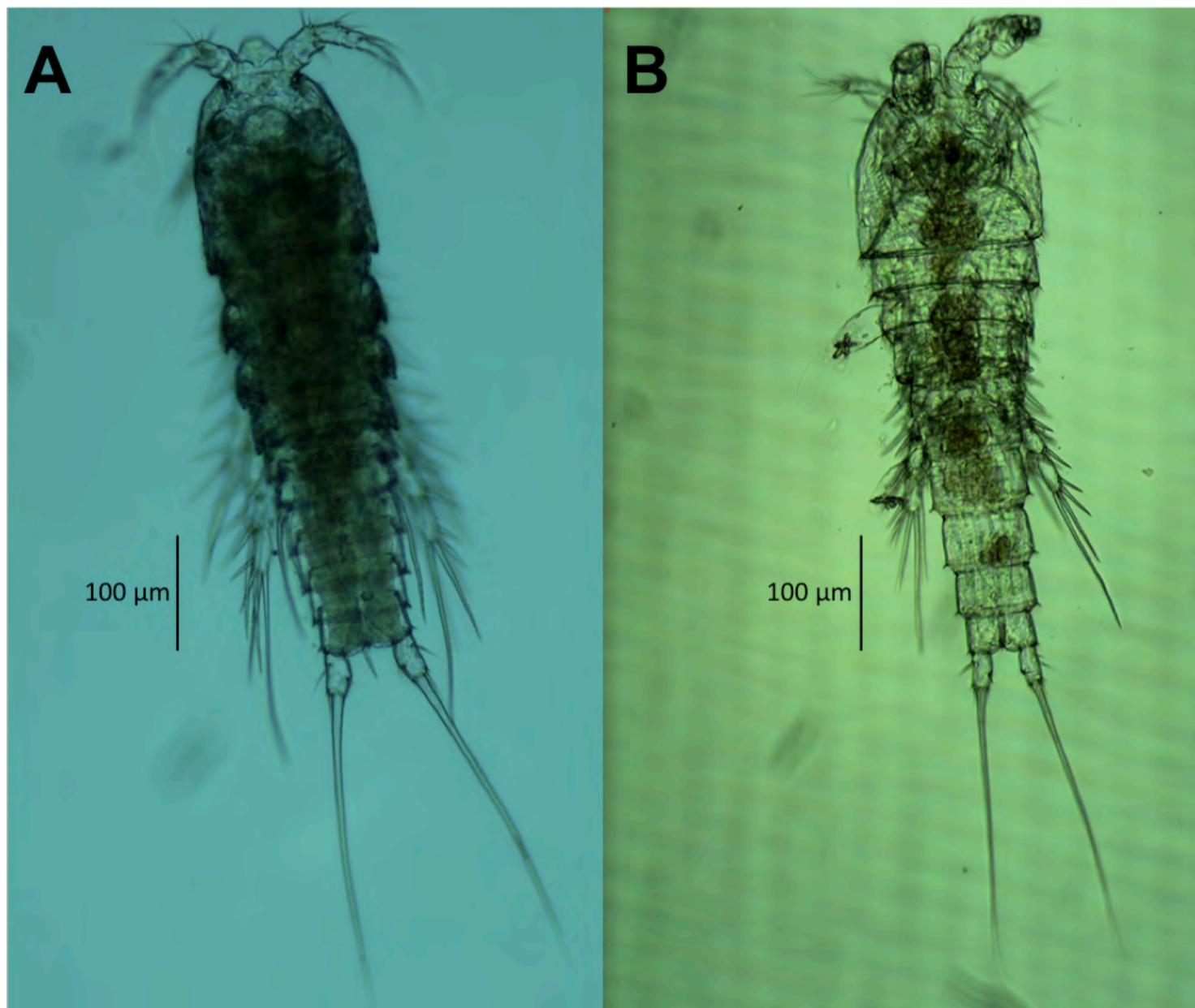


Figura 12.3. Hembra (A) y macho (B) adultos de *C. gomezi*, vista ventral, microscopio compuesto (20x). (Fotografías: Omar A. Barrera-Moreno).

rama caudal más larga que ancha (Fig.12.1, en color amarillo), 3) antenas (A1) de 6 segmentos con aestetasco largo en el cuarto segmento (Fig. 12.1 en color azul), 4) maxila con tres lóbulos (Fig. 12.1C), y 5) exopoditos (EXP) de 3 segmentos y endopoditos (ENP) de 2 segmentos de las patas 1-4 (Fig. 12.2 A-D).

Estos especímenes se pueden comparar con otras especies similares también relacionadas con *C. deitersi*, como son *C. stimpsoni*, *C. deboradexterae* y *C. sinaloensis*, descritas por Gómez, Fleeger, Rocha-

Olivares y Foltz (2003). Sin embargo, esta especie se distingue de sus congéneres más cercanos por la combinación de una serie de caracteres que difieren de manera consistente en algunas estructuras anatómicas de importancia taxonómica, tanto en machos como en hembras (véase, Suárez-Morales *et al.* 2013, para detalles). Entre estas características distintivas, destaca el último segmento de la antena, pues en *C. stimpsoni* la especie más cercana morfológicamente a *C. gomezi* se observa una seta interna adi-

cional a las dos setas rígidas (en color rosa en la Fig. 12.1 A) que muestra *C. gomezi*. De esta manera, Suárez-Morales *et al.* (2013) determinaron que los organismos que habitan Alchichica pueden ser considerados una especie nueva.

Los individuos de ambos sexos de *C. gomezi* muestran una talla promedio de 0.4 mm, su cuerpo es casi cilíndrico y tienen el cefalosoma (fusión de la cabeza con el primer segmento torácico) ancho (Fig. 12.3), aunque en los machos se observan ornamentaciones y espínulas en el margen posterior de la superficie dorsal de esta estructura, así como filas de espínulas en los márgenes de todos los prosomitas. Las anténulas cuentan con 6 segmentos y son geniculadas en los machos.

El patrón de espinas y setas de las patas 1 a 4 se presenta en la Tabla 12.1. La pata 6 en los machos forma una placa curva sin ornamentaciones, mientras que, en las hembras, cuenta con una pequeña seta con dos series de sétulas (Fig. 12.2 E).

Debido a las variaciones en el oleaje, los cambios en la vegetación, la presencia-ausencia de microbiolitos y al tamaño de las partículas del sedimento, las características físicas de la zona litoral en Alchichica son distintas a lo largo de sus 5 km de circunferencia (Ramos-Hernández *et al.* 2015). Lo anterior ha permitido la generación de condiciones ambientales heterogéneas y la posterior ocupación de estos microhábitats por el mismo conjunto de especies, pero en diferente proporción de abundancia de individuos de cada una en los distintos sitios, lo que podría generar cambios en la composición de las redes tróficas de cada pequeña localidad.

Entre el meio bentos distribuido en los hábitats litorales de este lago, *C. gomezi* comparte esta comunidad con varias especies de nemátodos, ostrácodos, anfípodos, ácaros, oligoquetos y quironómidos (Alcocer *et al.* 2015). Sin embargo, en términos de abundancia y biomasa, sus números son relativamente bajos, en especial comparados a

Hábitat

Tabla. 12.1. Fórmula espina de las patas P1-P4 de *C. Gomezi*. Número de setas o espinas por segmento. Las espinas se indican en números romanos y las setas en arábigos (tomado de Suárez-Morales *et al.* 2013).

| | Basis | Endopodito | Exopodito |
|--------|-------|-------------|----------------|
| Pata 1 | I-1 | 0-1;2-1 | I-0;I-1; I,3 |
| Pata 2 | 0-1 | 0-0;II,1,1 | I-0;I-1;II,2,1 |
| Pata 3 | 0-1 | 0-0;III,1,1 | I-0;I-1;II,3,1 |
| Pata 4 | 0-1 | 0-0;2 | I-0; I-1; II,2 |

los números registrados de nemátodos y de ostrácodos (por ejemplo, *Limnocytherina axalapasco*) (Ramos-Hernández *et al.* 2015). De esta manera, por encontrarse registrado hasta ahora sólo en Alchichica, particularmente en la zona litoral y en bajas densidades, *C. gomezi* parece cumplir con condiciones de rareza de hábitat, biogeográfica y demográfica (Halffter 1994), que permiten considerarla como un taxón muy particular ecológicamente hablando y con un potencial de distribución muy restringido, similar al de otras especies del mismo lago.

Esta especie de copépodo se ha adaptado a la salinidad particular de Alchichica (sólidos disueltos totales o TDS = $8.5 \pm 0.52 \text{ g L}^{-1}$; conductividad a 25°C , $K_{25} = 13 \pm 0.5 \text{ mS cm}^{-1}$) y a sus condiciones alcalinas (pH 9.0 ± 0.1). Su mayor densidad poblacional y biomasa ($4,106 \pm 10,962 \text{ ind. m}^2$ y $3.66 \pm 9.75 \text{ mg C m}^2$, respectivamente) se localiza a menos de tres metros de profundidad y no se encuentran individuos a profundidades mayores a 10 m. Este copépodo vive a lo largo de todo el litoral del lago, en aguas bien oxigenadas, con abundante cobertura vegetal de *Ruppia maritima* y *Cyperus laevigatus*, y sedimentos arenosos ricos en materia orgánica y carbonatos (Alcocer *et al.* 2015).

Como otros copépodos de vida libre, *C. gomezi* probablemente es una pieza importante de las redes tróficas que lo involucran. Tal como muestran Vopel *et al.* (1996), algunas especies de *Cletocamptus* pueden ser muy tolerantes a condiciones anóxicas o de altas concentraciones de sulfuro. En este

caso particular, *C. gomezi* podría considerarse como un consumidor primario de recursos locales tales como las diatomeas bentónicas que cubren a los estromatolitos establecidos en Alchichica (Alcocer *et al.* 2015), así como otras especies de microalgas, bacterias y la materia orgánica depositada en los sedimentos. Por otra parte, algunos organismos de mayor talla, como larvas de libélulas, coleópteros, moscas e incluso peces como *Poblana alchichica*, podrían alimentarse de este harpacticoide. De esta manera, las perturbaciones ambientales (*i. e.*, contaminación, disminución en el nivel del agua, introducción de especies exóticas, etc.) que afectan tanto a sus consumidores como a su alimento, podrían tener un efecto no sólo en las poblaciones de *C. gomezi*, sino sobre toda la diversidad biológica local, en muchos casos endémica, contenida en el lago Alchichica.

Agradecimientos

OABM agradece al CONACyT por la beca otorgada para realizar sus estudios de Doctorado (beca #316376), así como al Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología (UNAM); ESM al Colegio de la Frontera Sur por su apoyo institucional y JCP al Proyecto CONACyT 255788 por el apoyo a esta investigación.

Referencias

Alcocer, J., M. C. Hernández, L. A. Oseguera & E. Escobar. 2015. On the ecology of *Cleto-*

- camptus gomezi* Suárez-Morales, Barrera-Moreno & Ciro-Pérez 2013 (Crustacea, Copepoda, Harpacticoida) micro-endemic to Lake Alchichica, Central Mexico. *Journal of Limnology* 74: 302-309.
- Barrera-Moreno, O., J. Ciro-Pérez, E. Ortega-Mayagoitia, A. Alcántara-Rodríguez & E. Piedra-Ibarra. 2015. From local adaptation to ecological speciation in copepod populations from neighboring lakes. *PLoS ONE* 10: e0125524.
- Elías-Gutiérrez, M., E. Suárez-Morales, M. A. Gutiérrez-Aguirre, M. Silva-Briano, J. G. Granados-Ramírez & T. Garfias-Espejo. 2008. Cladocera y Copepoda de las aguas continentales de México. UNAM, México, D.F. 322 p.
- Fleeger J. W. 1980. Morphological variation in *Cletocamptus* (Copepoda: Harpacticoida), with description of a new species from Louisiana salt marshes. *Transactions of the American Microscopical Society* 99: 25-31.
- Gómez, S., J. W. Fleeger, A. Rocha-Olivares & D. Foltz. 2004. Four new species of *Cletocamptus* Schrankewitsch, 1875, closely related to *Cletocamptus deitersi* (Richard, 1897) (Copepoda: Harpacticoida). *Journal of Natural History* 38: 21, 2669-2732.
- Gómez, S. & J. M. Gee. 2009. On four new species of *Cletocamptus* Shmankevich, 1875 (Copepoda: Harpacticoida) from inland waters of Argentina. *Journal of Natural History* 43: 45-46, 2853-2910.
- Gutiérrez-Aguirre, M., A. Cervantes-Martínez & M. Elías-Gutiérrez. 2013. An Example of How Barcodes Can Clarify Cryptic Species: The Case of the Calanoid Copepod *Mastigodiaptomus albuquerquensis* (Herrick). *PLoS ONE* 9: e85019.
- Halfpeter, G. 1994. ¿Qué es la biodiversidad? *Butlletí de la Institució Catalana d'Història Natural* 62: 5-14.
- Knowlton, N. 1993. Sibling species in the sea. *Annual Review of Ecology, Evolution and Systematics* 24: 189-216.
- Leasi, F., C. Q. Tang, W. H. de Smet & D. Fontaneto. 2013. Cryptic diversity with wide salinity tolerance in the putative euryhaline *Testudinella chlypeata* (Rotifera, Monogononta). *Zoological Journal of the Linnean Society* 168: 17-28.
- Mielke, W. 2000. Two new species of *Cletocamptus* (Copepoda: Harpacticoida) from Galápagos, closely related to the cosmopolitan *C. deitersi*. *Journal of Crustacean Biology* 20: 273-284.
- Montiel-Martínez A, J. Ciro-Pérez, E. Ortega-Mayagoitia & M. Elías-Gutiérrez. 2008. Morphological, ecological, reproductive and molecular evidence for *Leptodiaptomus garciai* (Osorio-Tafall 1942) as a valid endemic species. *Journal of Plankton Research* 30: 1079-1093.
- Ramos-Hernández V., L. A. Oseguera, J. Alcocer, M. C. Hernández-Fonseca & V. J. J. Pérez-Rodríguez. 2015. La comunidad meiobentónica de dos hábitats contrastantes de la zona litoral del lago-cráter Alchichica, Puebla. En Alcocer, J., M. Merino-Ibarra y E. Escobar-Briones. (Eds). *Tendencias de investigación en Limnología tropical: Perspectivas universitarias en Latinoamérica*. Asociación Mexicana de Limnología, A.C., Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM, y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. México.
- Reid, J. W. & C. E. Williamson. 2010. Copepoda. En J. H. Thorp y A. P. Covich (Eds). *Ecology and Classification of North American Freshwater Invertebrates*. 3ª ed. Academic Press, Inc., San Diego. p. 829-899.
- Suárez-Morales, E., J. W. Reid, T. H. Iliffe & F. Fiers. 1996. Catálogo de los copépodos (Crustacea) continentales de la península de Yucatán, México. El Colegio de la Frontera Sur, México. 296 pp.
- Suárez-Morales E. 2007. On the taxonomic status of *Balaenophilus umimegacolus* Ogawa Matsuzaki & Mizaki, 1997 (Copepoda, Harpacticoida), a symbiont of manatees and sea turtles. *Crustaceana* 80: 1147-1152.

- Suárez-Morales, E., O. Barrera-Moreno & J. Ciros-Pérez. 2013. A new species of *Cletocamptus* Schrankewitsch, 1875 (Crustacea, Copepoda, Harpacticoida) from a high altitude saline lake in Central Mexico. *Journal of Limnology* 72: 313-325.
- Suárez-Morales, E. 2015. Class Maxillopoda. En J. H. Thorp y D. C. Rogers (Eds). *Thorp and Corvich's Freshwater Invertebrates, Ecology and General Biology* Vol. 1. 4^a Ed. Elsevier. 709-755.
- Vopel, K., J. Dehmlow & G. Arlt. 1996. Vertical distribution of *Cletocamptus confluens* (Copepoda, Harpacticoida) in relation to oxygen and sulphide microprofiles of a brackish water sulphuretum. *Marine Ecology Progress Series* 141: 129-137.

Contacto

Omar A. Barrera-Moreno. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.
omarichdien@gmail.com

Eduardo Suárez-Morales. El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). Unidad Chetumal. Apdo. Post. 424. CP 77014. Chetumal, Quintana Roo, México.

Jorge Ciros-Pérez. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.





El axayácatl

Enrique Kato

Javier Alcocer

Elva Escobar

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Arthropoda
Clase: Insecta
Orden: Hemiptera
Familia: Corixidae
Género: *Krizousacorixa*
Especie: *Krizousacorixa tolteca* (Jansson 1979)
Nombre común: Axayácatl o mosco

Los coríxidos son insectos acuáticos del grupo de los hemípteros, al cual pertenecen por ejemplo, las chinches; a diferencia de sus parientes terrestres, los coríxidos pasan todo su ciclo de vida en el agua y no parasitan a otros organismos. Son conocidos con el nombre común de “mosco”. Las diversas especies distribuidas por todo el mundo son de talla pequeña y alcanzan desde unos algunos milímetros hasta poco más de un centímetro en casos raros. Habitan preferentemente en aguas someras de estanques, lagos y pozas de agua y se distinguen fácilmente porque con cierta frecuencia deben subir desde el fondo hasta la superficie para renovar su reserva de aire.

Descripción de la especie

El tamaño de *Krizousacorixa tolteca* va desde los 4.6 hasta los 5.6 mm de largo y con una anchura máxima (la cabeza) entre 1.6 y 1.75 mm. Su color es café claro con un patrón fino de líneas más oscuras transversales irregulares e interrumpidas, patrón característico de la familia (Fig. 13.1).

Los machos tienen modificados los tarsos o partes distales de las dos patas delanteras, que muestran una forma expandida a manera de “pala”, dotada de cerdas y pequeñas protuberancias dispuestas en un arreglo característico de cada especie.

Precisamente, esa disposición de las ornamentaciones fue uno de los elementos que sirvió para diferenciar a *K. tolteca* como una especie nueva (Jansson 1979) y endémica del lago Alchichica (Fig. 13.2), de



Figura 13.1. El “mosco” —corixido— *Krizousacorixa tolteca*. (Se señala la escala en micrómetros). (Fotografía: María del Carmen Hernández).

las otras dos especies de hemípteros del mismo género como son *K. femorata*, de amplia distribución en Norteamérica y *K. azteca* de amplia distribución en el centro del país (Hungerford 1948).

K. tolteca es la más pequeña de las tres especies del género y en ésta, las protuberancias de la pala forman dos líneas: la superior con 12 protuberancias formando un arco y la inferior con cinco protuberancias posicionadas cerca de la fila superior de cerdas (Fig. 13.2). Una característica que distingue a los machos de las hembras, es la asimetría de sus segmentos abdominales, para alojar la cápsula genital que protege el órgano reproductivo del macho y dar cabida a un órgano rugoso denominado “estrígil” en la superficie dorsal, el cual se usa para estridular, es decir, producir un sonido repetitivo que les sirve como llamada sexual para atraer a la hembra al frotar dicha estructura con el borde de su par de alas

anteriores, las cuales están parcialmente endurecidas y por ello reciben el nombre de hemielitros.

La asimetría tiene una orientación mayoritariamente hacia la derecha (dextral), aunque existen ejemplares con asimetría hacia la izquierda (sinistral), por lo que se debe ser cauto al considerar este rasgo morfológico para la determinación de la especie. En *K. femorata* se demostró que la configuración dextral o sinistral de la asimetría en cada individuo de la especie, varía por razones hereditarias (Peters 1963).

Biología y ecología

Los adultos depositan sus huevos adhiriendo cada uno a la superficie de los estromatolitos o bien del pasto acuático *Ruppia maritima*. De la eclosión emerge una ninfa que pasará por cinco estadios de desarrollo (Fig. 13.3) en los que aumentará su tamaño

e irá desarrollando las alas anteriores o hemiélitros y las alas posteriores membranosas para convertirse en adulto. Todo el ciclo de vida se cumple en el medio acuático y bajo condiciones de cultivo en laboratorio se ha encontrado que toma alrededor de cinco semanas.

Su posibilidad de dispersión a otros cuerpos acuáticos es reducida debido a su incapacidad para volar y a que la totalidad de su ciclo de vida ocurre en el medio acuático (esto quiere decir que es hololímico), por lo que los coríxidos de lagos antiguos como en este caso, resultan muy atractivos para entender cómo es que evolucionaron y se diferenciaron de otras especies, al haber estado aislados de otros lagos con características similares (Klass-Douwe *et al.* 2014). El carácter permanente del lago Alchichica es otro factor que no favorece la dispersión de los organismos.

En los ambientes temporales o efímeros el transporte de organismos por vectores animales, principalmente aves, es un mecanismo importante de dispersión entre cuerpos acuáticos (Bilton *et al.* 2001). Uno de los riesgos asociados a la dispersión, es la dificultad de encontrar otro hábitat con las características fisicoquímicas similares a las del entorno de las que provienen; en el caso de Alchichica, que tenga la misma salinidad y la composición iónica, por lo que ambos factores pueden explicar, al menos en parte, la distribución tan restringida de la especie y quizá determinar asimismo, su vulnerabilidad ante los cambios del nivel de agua en el ambiente litoral, que es a donde habita.

Los coríxidos tienen flotabilidad positiva, esto es que no se hunden, lo que les facilita subir a la superficie con cierta frecuencia para respirar; permanecen la mayor

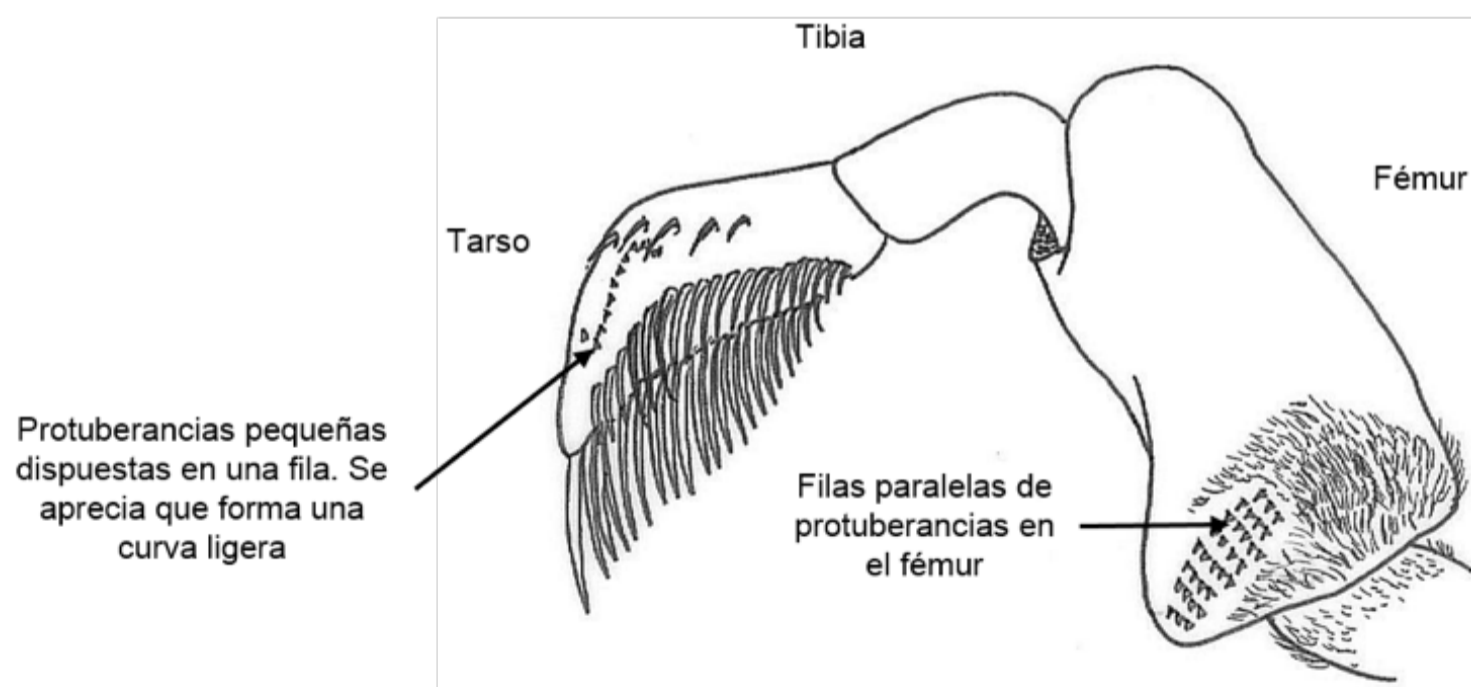


Figura 13.2. Pala de un ejemplar macho de *K. tolteca* en el que se aprecian las cerdas y la disposición de las pequeñas protuberancias en el tarso y en el fémur. (Dibujo modificado de Hungerford, 1948, por Esmeralda Morales Domínguez).



Figura 13.3. Fotografía del cuarto estadio ninfal de *K. tolteca*. Ejemplar colectado en Alchichica. (Fotografía: María del Carmen Hernández).

parte del tiempo sujetándose en los fondos someros del litoral donde pueden obtener su alimento raspando los detritos (materia orgánica, microalgas y bacterias) que crecen sobre el sustrato. En este sentido se considera que sus movimientos verticales en la columna de agua, ayudan a provocar un intercambio de nutrientes entre el fondo donde toma su alimento, a la superficie donde puede ser consumido.

Escobar-Briones *et al.* (1998) confirmaron que las redes alimenticias que se basan en el aprovechamiento de los detritos originados por el crecimiento de *Ruppia maritima* son muy importantes en el ambiente litoral de Alchichica. Al igual que con otros corixidos, se reconoce que sus hábitos alimenticios son poco conocidos; en un estudio de la diversidad de hábitos

alimenticios de este grupo, Hädicke *et al.* (2017) informan que también pueden ser depredadores y “emboscan” a su presa esperando escondidos entre la vegetación, o bien, son cazadores pelágicos (de media agua) activos capturando a los organismos que viven asociados a la superficie del agua (hiponeuston) como, por ejemplo, las larvas o pupas de mosquitos.

El tamaño más pequeño de *K. tolteca* va en contra de la idea de que sea un depredador activo, pero por otro lado, está poco expuesto a ser consumido por otros depredadores acuáticos; el principal depredador en la zona litoral de Alchichica es el charal *Poblana alchichica*, que se alimenta mayormente de copépodos, anfípodos y culícidos (un tipo de mosquito) y con poca presencia de corixidos en su dieta. Además, sólo las

tallas menores de 50 mm de los charales llegan a alimentarse de coríxidos, mientras que los charales de mayor talla que se distribuyen tanto en zona litoral como la pelágica, no los consumen (Flores-Negrete 1998).

Por otra parte, la heterogeneidad espacial del lago caracterizada por la presencia de un anillo perimetral litoral delimitado por los estromatolitos, determina que sea la zona de mayor abundancia (y en ciertas condiciones de mayor diversidad) de organismos macrobentónicos entre los que se encuentran el anfípodo *Hyaella azteca* y el mosquito *Chironomus stigmatarius* (Alcocer *et al.* 2016), por lo cual no puede descartarse que los coríxidos los consuman como lo describen Hädicke *et al.* (2017) para la tribu Corixini a la que pertenece *K. tolteca*.

Usos y estado de conservación

Los coríxidos son sujetos de un aprovechamiento tradicional en su estadio adulto en algunos lugares de México (por ejemplo, el lago de Cuitzeo) como alimento para aves canoras. Conocidos como “mosco” o por su nombre náhuatl “*axayácatl*” (*axayācatl*, ‘el rostro de agua’ ‘*ā*-, agua; *xāyāca*-, rostro; *-tl*, sufijo’), se cosechan sus huevos –cuyo tamaño es de alrededor de 1 mm–, conocidos como “*ahuautle*” del náhuatl *ahuautli* ó *ahuahutli*, [a'wawtʰi] (*ahuautle* o *ahuahutle* [a'wautle] es el nombre españolizado) (“bolitas de agua”, en español) y consumido como alimento humano desde tiempos

prehispánicos (Ramos-Elorduy 2008). En el códice Florentino, se ilustra el glifo Azteca del axayácatl (Fig. 13.4). Aunque actualmente el “revoltijo” o romeritos, tradicional guiso de Cuaresma en la capital, se acompaña con tortitas de camarón originalmente las tortitas se hacían con ahuate obtenido principalmente del lago de Texcoco. El sabor salado del ahuate proveniente de las aguas saladas del lago de Texcoco ricas en tequesquite, fue reemplazado por camarón seco y salado molido. En Alchichica no se ha observado que se le de este uso quizás debido a que no se desarrolla en grandes cantidades.

Parsons (2010) refiere que la ausencia de grandes herbívoros (p.ej., vacas) en la Mesoamérica precolombina motivó la búsqueda de fuentes alternativas de proteínas entre las cuales los insectos ocuparon parte de ese nicho de “pastoreadores” en las tierras acuáticas de la Cuenca de México y especialmente en los lagos salinos de Texcoco, donde la actividad de extracción de insectos acuáticos está documentada incluso hasta el

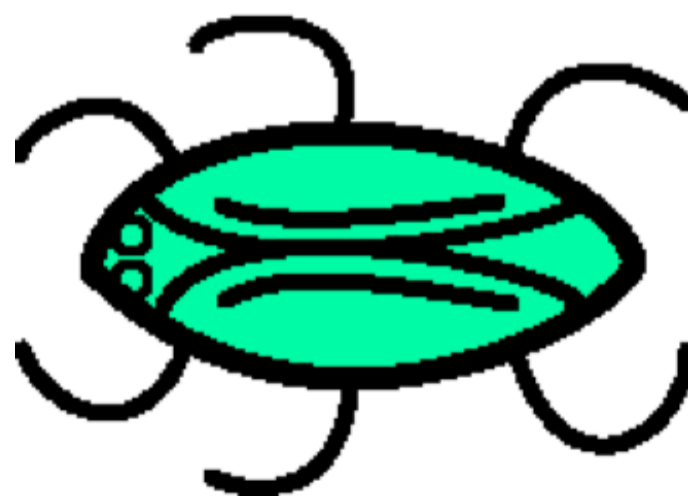


Figura 13.4. Glifo Azteca de un coríxido o “axayácatl” tal como se ilustra en el Códice Florentino. [Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/Axay%C3%A1catl_\(insecto\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Axay%C3%A1catl_(insecto))]

siglo veinte. Entre los insectos comestibles, el ahuate contiene hasta 56.55% de proteína. En lugares como el Estado de México (otras especies), se utiliza la técnica de dejar flotando manojos de pastos anclados al sedimento, que resultan atractivos para que los coríxidos fijen sus huevecillos y así facilitar su posterior cosecha. Desafortunadamente, el aprovechamiento del ahuate para consumo humano ha decaído por causa de la contaminación de los cuerpos de agua.

En cuanto al estado de conservación de la especie, *K. tolteca* comparte algunos de los criterios utilizados por Alcocer *et al.* (2010) para establecer el nivel de riesgo de extinción que tiene el charal *P. alchichica*, entre los que se encuentran la reducida extensión de su distribución en México, los cambios en la condición del hábitat litoral que provoca el descenso del nivel de agua y el aporte de detergentes por actividades de lavado de ropa en la zona litoral.

Un riesgo potencial sobre la fauna de Alchichica es la posibilidad de introducción o invasión por especies de poecílicos como *Gambusia affinis* y *G. holbrooki*, peces introducidos ampliamente alrededor del mundo como control biológico de mosquitos, para los cuales ya se ha documentado el impacto que producen en poblaciones de coríxidos en otros cuerpos de agua (Pyke 2008).

Por último, una recomendación importante sobre esta especie microendémica, es analizar con detalle las presiones y posibles riesgos de extinción a los que se encuentra sometida dados los cambios

constantes en las condiciones del hábitat litoral que ya se comentaron, entre los que destacan el descenso del nivel del lago.

Agradecimientos

Esta contribución fue posible gracias al apoyo e interés de CIATEC, centro público de investigación y desarrollo tecnológico CONACYT.

Referencias

- Alcocer, J., E. Arce, L. Zambrano & X. Chiappa-Carrara. 2010. *Poblana alchichica*: A threatened silverside species? *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*. 30: 1429-1432.
- Bilton, D. T., J. R. Freeland & B. Okamura. 2001. Dispersal in freshwater invertebrates. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 32: 159-181.
- Escobar-Briones, E., J. Alcocer, E. Cienfuegos & P. Morales. 1998. Carbon stable isotopes ratios of pelagic and littoral communities in alchichica crater-lake, México. *International Journal Salt Lake Research* 7: 345-355.
- Flores-Negrete, E. 1998. Estudio poblacional de tres especies de *Poblana* (Pisces: Atherinopsidae) en tres lagos cráter de Puebla, México. Tesis de Maestría en Ciencias. UNAM. Ciudad de México, México.
- Hädicke, W., D. Rédei & P. Kment, 2017. The diversity of feeding habits recorded for water boatmen (Heteroptera: Corixidae) world-wide with implications for evaluating information on the diet of aquatic insects. *European Journal of Entomology*. 114: 147-159.
- Hungerford, H. B. 1948. The Corixidae of the western hemisphere (Hemiptera). *The Uni-*

versity of Kansas Science Bulletin, Cap. III 32: 187-235.

Jansson, A. 1979. A new species of *Krizousacorixa* from Mexico (Heteroptera, Corixidae). *Pan-Pacific Entomologist* 55: 258-260.

Klass-Douwe, B. D., M. T. Monaghan & S. U. Pauls. 2014. Freshwater biodiversity and aquatic insect diversification. *Annual Review of Entomology*. 59: 143-163.

Parsons, J. R. 2010. The pastoral niche in Pre-Hispanic Mesoamerica. En Staller, J. E. & M. D. Carrasco (Eds.), *Pre-Columbian foodways: Interdisciplinary Approaches to food, culture, and markets in ancient Mesoamerica*.

Peters, W. P. 1963. Inheritance of asymmetry in *Krizousacorixa femorata* (Guérin). *Genetica* 34: 211-227.

Pyke, G. H. 2008. Plague minnow or mosquito Fish? A review of the biology and impacts of introduced *Gambusia* species. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*. 39: 171-191.

Ramos-Elorduy, J. 2008. Energy supplied by edible insects from Mexico and their nutritional and ecological importance. *Ecology of Food and Nutrition* 47: 280-297.

Contacto

Enrique Kato. CIATEC. Dirección de Soluciones Tecnológicas. Omega 201. Col. Industrial Delta, C.P. 37545, León, Guanajuato, México.
ekato@ciatec.mx

Javier Alcocer. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.

Elva Escobar. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Laboratorio de Biodiversidad y Macroecología, A.P. 70-305 Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.





El ajolote

Gabriela Parra-Olea

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Chordata

Clase: Amphibia

Orden: Caudata

Familia: Ambystomatidae

Género: *Ambystoma*

Especie: *Ambystoma taylori* (Brandon, Maruska y Rumph 1982)

Nombre común: Ajolote de Alchichica o salamandra de Taylor

El término anfibio es una palabra derivada del griego que significa *amphi* (“ambos”) y *bios* (“vida”), o sea “ambas vidas” o “en ambos medios”. Esto se refiere a que los anfibios, a diferencia del resto de los animales, presentan dos fases bien definidas en su desarrollo: la fase larvaria, que se lleva a cabo en el agua y la fase terrestre que como su nombre lo indica se lleva a cabo en la tierra. Los anfibios se distinguen por sufrir una transformación durante su desarrollo, este cambio puede ser drástico y se denomina metamorfosis. Durante la metamorfosis, las larvas (también llamadas ajolotes o renacuajos) pierden las branquias externas, la cola (en sapos y ranas) y desarrollan las cuatro patas para convertirse en los típicos organismos adultos que conocemos. Sin

embargo, algunas especies de anfibios, específicamente de salamandras, no siguen el patrón normal de metamorfosis, no se transforman en organismos terrestres, nunca salen del agua y se mantienen en forma de larva toda su vida. A este proceso se le llama, neotenia o pedomorfosis.

Ambystoma taylori (Fig. 14.1) es una especie de salamandra neoténica de tamaño corporal grande. Los adultos generalmente crecen a una media de 76 mm (longitud hocico-cloaca), con un rango de aproximadamente 60-113 mm (Brandon *et al.* 1982). La cabeza del adulto es grande, ancha y casi triangular. Los adultos conservan tres pares de branquias externas con 19 a 26 branquiespinas. Esta especie tiene de 14-16 vértebras troncales y 13 o más surcos costales.



Figura 14.1. El ajolote de Alchichica *Ambystoma taylori*. (Fotografía: Valeria Mas).

La cola es aproximadamente tres cuartos de la longitud hocico-cloaca. Hay una aleta dorsal del cuerpo visible con una base amplia y carnosa que se extiende desde la base de la cabeza hasta la cola, siendo más ancha en la cabeza y se estrecha a medida que se extiende hacia la cola. Todas las extremidades están completamente desarrolladas. Cuando las extremidades se pegan a lo largo del cuerpo, éstas se superponen por entre tres y cuatro pliegues intercostales. Los adultos tienen los dedos de las manos cortos y tienen forma de cono. Los dedos de los pies son anchos en la base y planos, con puntas queratinizadas que parecen uñas (Brandon *et al.* 1982).

Reproducción

Poco se sabe sobre la historia de vida de *Ambystoma taylori*, sin embargo, la observación directa de los óvulos en organismos depositados en colecciones científicas, indican que *A. taylori* tiene puestas con cientos de huevos. De igual manera con base en observación directa de organismos silvestres, se sabe que esta especie se vuelve reproductivamente madura cuando los organismos alcanzan una longitud hocico-cloaca de aproximadamente 70 mm. Los ajolotes se pueden diferenciar en machos o hembras desde que miden aproximadamente 10 centímetros de largo. Los machos presentan

una protuberancia detrás de las patas traseras, justo donde comienza la cola, denominados labios cloacales, que se hinchan durante la época reproductiva. Ésta es la única estructura morfológica que permite diferenciarlos a simple vista ya que las hembras no tienen ese bulto en la cloaca.

Color

Los adultos de *Ambystoma taylori* poseen una coloración característica, presentan diversos tonos de amarillo: dorado, amarillo canario, amarillo pálido o bronceado tenue (Fig.14. 2). Tienen numerosos puntos de color marrón claro, que miden de 1 a 3 mm que dominan el lado dorsal, a todo lo largo

del cuerpo y cola. La superficie ventral también es de color amarillo pálido, pero está cubierta de manchas que son de un color más oscuro (Brandon *et al.* 1982).

Hábitat

Ambystoma taylori se encuentra única y exclusivamente en el lago Alchichica en Puebla, México. Se han encontrado salamandras a distintas profundidades desde la superficie y hasta unos 12 m. *Ambystoma taylori* es la única especie de anfibio conocida en este lago, mientras que se han encontrado otras especies de salamandras en otros lagos del área circundante (Camarillo 1998).



Figura 14.2. El ajolote de Alchichica *Ambystoma taylori*. (Fotografía: Valeria Mas).

Historia taxonómica

La especie de salamandra presente en el lago Alchichica fue descrita por Taylor en 1943 y la nombró *Ambystoma subsalsum*. Taylor utilizó ejemplares transformados (adultos terrestres) y pedomórficos como base para describir la especie, usando uno de los ejemplares transformados como el holotipo (espécimen a partir del cual se ha perfilado la descripción de la especie, y que se conserva permanentemente en una colección biológica institucional).

Posteriormente, Brandon *et al.* (1981) demostraron que los ejemplares transformados y los ejemplares neoténicos utilizados por Taylor correspondían a dos especies diferentes. Brandon *et al.* (1981) señalaron que el holotipo de *A. subsalsum* era en realidad un ejemplar de *A. tigrinum* que rechazaba la validez de *A. subsalsum*. Brandon *et al.* (1981) proponen el nombre *A. taylori* para los ejemplares neoténicos de Alchichica. Para demostrar que el ejemplar transformado, el holotipo de *A. subsalsum* (un macho adulto metamorfoseado) realmente no correspondía a la especie pedomórfica presente en el lago Alchichica, Brandon *et al.* (1981) estudiaron ejemplares vivos en condiciones de cautiverio y comprobaron que los pocos ejemplares de *A. taylori* que llevaban a cabo la metamorfosis eran claramente diferenciables del ejemplar que encontró Taylor y también de todos los ejemplares examinados de *A. tigrinum*. De igual forma, estos autores comprobaron que los ejemplares pedomórficos de *A. ti-*

grinum de otras localidades diferían considerablemente de los de *A. taylori*. Al seguir el criterio de Brandon *et al.* (1981) existen dos especies de *Ambystoma* en los alrededores del lago Alchichica: *A. taylori* especie neoténica dentro del lago y *A. velasci* (anteriormente llamada *A. tigrinum*) especie metamórfica presente en los lagos cráter cercanos al lago Alchichica como Quechulac, La Preciosa o Las Minas, Atexcac y Tecuitlapa, y ocasionalmente colectado en las orillas del lago Alchichica.

Relaciones filogenéticas

Ambystoma taylori está estrechamente emparentada con las poblaciones de *A. velasci* en la meseta del este de México (Shaffer y McKnight 1996) y con otras especies como con *A. mexicanum*, *A. dumerilii* y *A. ordinarium* (Shaffer 1984, Weisrock 2006).

Un estudio reciente usando datos de ADN de las poblaciones de *Ambystoma* presentes en algunos de los lagos cráter de Puebla (Alchichica, Quechulac, La Preciosa, Atexcac y Tecuitlapa) demostró que la población de *A. taylori* es una población que no tiene inmigrantes de organismos de las cuencas aledañas, sin embargo, la diversidad genética encontrada en la especie indica que la población es grande y que no ha sufrido reducciones drásticas (Percino-Daniel *et al.* 2016). Es muy probable que lo anterior sea resultado de las condiciones químicas tan peculiares que tiene el lago Alchichica como es el elevado nivel de salinidad ya que organismos provenientes de otros lagos podrían no tolerar



Figura 14.3. El ajolote de Alchichica *Ambystoma taylori*. (Fotografía: Valeria Mas).

dicha salinidad. De la misma manera la alta adaptación que presenta *A. taylori* a las condiciones de Alchichica podría haber sido fundamental para su especiación (Fig. 14.3).

Amenazas

Ambystoma taylori es una de las especies de anfibios con distribución más restringida en todo México ya que está presente exclusivamente en el lago Alchichica (Percino-Daniel 2016) y como resultado de esto está clasificada como en peligro crítico por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN). La mayor amenaza para la especie es la reducción de los niveles de agua en el lago des-

de mediados de la década los setenta (Alcocer *et al.* 2010). Esto se agrava por la intensificación de la agricultura de regadío en el área y la sobreexplotación de acuíferos subterráneos, así como los cambios climáticos. Estudios de sedimentos en el lago han revelado oscilaciones de volumen de agua en el último milenio, con episodios de mayor alcalinidad y cambios históricos en las profundidades de aproximadamente 2 m (Caballero *et al.* 2003). Los cambios en la calidad del hábitat como resultado de la contaminación química provocada por el uso de pesticidas y fertilizantes en los campos circundantes que drenan directamente al lago, también es un riesgo importante.



Figura 14.4. El ajolote de Alchichica *Ambystoma taylori*. (Fotografía: Valeria Mas)

Por el contrario, un posible beneficio de conservación para la especie es la adaptación de ésta a la alta salinidad y alcalinidad de Alchichica, lo cual impide la introducción de la mayoría de las especies exóticas de agua dulce, gran amenaza para los anfibios en todo el mundo (Pimentel *et al.* 2001, Kats y Ferrer 2003). Las especies exóticas introducidas son consideradas una de las principales amenazas para las últimas poblaciones silvestres de *A. mexicanum*, otra especie microendémica, neoténica y en peligro crítico (Zambrano *et al.* 2007, Recuero *et al.* 2010).

La pesca en Alchichica es limitada y se centra principalmente en los peces aterinidos endémicos (*Poblana alchichica*) (Alcocer *et al.* 2010). De hecho, no hay registros de que los locales lo pesquen ni para su consumo ni para la elaboración de remedios como sucede en otros lugares como en el lago de Pátzcuaro con la especie *A. dumerilii*, también en peligro de extinción. Los hábitos de *A. taylori* lo mantienen relativamente a salvo de la pesca; por lo que la sobreexplotación para el consumo humano no es una gran preocupación para la conservación/supervivencia de *A. taylori*, como lo es para otros *Ambystoma* pedomórficos (Huaucuz 2001). Desde una perspectiva de genética de conservación, *Ambystoma taylori* (Fig. 14. 4) todavía muestra las señales de una población relativamente saludable, con alta diversidad genética y baja endogamia en comparación con otras especies microendémicas de *Ambystoma* (Parra-Olea *et al.* 2012, Percino-Daniel *et al.* 2016). Las accio-

nes directas de conservación para *A. taylori* serán más efectivas si se dirigen a problemas que actualmente afectan la calidad del hábitat, específicamente la reducción del volumen por sobreexplotación de acuíferos.

El ajolote en la mitología azteca

Xolotl, un dios necio y escurridizo que no estaba dispuesto a morir. Cuenta la leyenda que los dioses vivían en una época donde no había día ni noche. El Sol y la Luna aún no existían, sólo había oscuridad. La única forma de obtener luz era haciendo fuego, pero no era suficiente. Los dioses Nanahuatzin y Tecuciztécatl se sacrificaron en una hoguera para darle vida a los astros. Momentos después aparecieron el Sol y la Luna.

Sin embargo, la Luna brillaba demasiado y los dioses la golpearon con un conejo para disminuir su brillo. Aún así, algo no estaba bien, ambos permanecían inmóviles en el cielo. Los dioses debían sacrificarse para arreglarlo. El encargado de ejecutar a los dioses era Ehécatl, dios del viento. Se haría el sacrificio de Xólotl, dios del ocaso y los espíritus. Todos estaban de acuerdo con el sacrificio de Xólotl, excepto él, quién decidió huir antes de ser ejecutado. Debía esconderse para huir de la muerte. Entonces se transformó en un maíz de dos cañas.

Por esa razón los campesinos lo llaman xólotl, en honor al dios. Pero no sirvió de nada. Ehécatl lo encontró. Xólotl huyó por segunda vez. Se negó a morir, se transformó

en un maguey de dos cuerpos, al que ahora le llaman mexólotl. Ehécatl lo volvió a encontrar. Xólotl no se rendía y esta vez se ocultó en el agua, convirtiéndose en un anfibio. Creía estar seguro, hasta que Ehécatl apareció y esta vez se aseguró de que no huyera otra vez impidió su metamorfosis a salamandra. De esta forma, Xólotl murió pero el axolotl ya había nacido.

Agradecimientos

GPO agradece al proyecto IN203617 de la DGAPA por el apoyo recibido y a Valeria Mas por las fotografías incluidas en el presente capítulo, así como el texto del ajolote en la mitología azteca.

Referencias

- Alcocer J., E. Arce, L. Zambrano & X. Chiappa-Carrara. 2010. *Poblana alchichica*: a threatened silverside species? *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* 30: 1429-1432.
- Brandon, R. A., E. J. Maruska & W. T. Rumph. 1982. A new species of neotenic *Ambystoma* (Amphibia, Caudata) endemic to laguna Alchichica, Puebla, Mexico. *Bulletin Southern California Academy of Sciences* 80: 112-125.
- Caballero M., G. Vilaclara, A. Rodríguez & D. Juárez. 2003. Short-term climatic change in lake sediments from lake Alchichica, Oriental, Mexico. *Geofísica Internacional* 42: 529-537.
- Camarillo, J. L. 1998. Observaciones preliminares sobre los anfibios y reptiles de los lagos cráter de Puebla-Veracruz. *Anales del Instituto de Biología Universidad Nacional Autónoma de México Serie Zoología*, 69: 125-127.
- Huacuz E. D. 2001. Estado de Conservación del Género *Ambystoma* en Michoacán, México. Morelia: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Kats L. B., & R. P. Ferrer. 2003. Alien predators and amphibian declines: review of two decades of science and the transition to conservation. *Diversity and Distributions* 9: 99-110.
- Pimentel D., S. McNair, J. Janecka, J. Wightman, C. Simmonds, C. O'Connell, E. Wong, L. Russel, J. Zern, T. Aquino & T. Tsomondo. 2001. Economic and environmental threats of alien plant, animal, and microbe invasions. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 84: 1-20.
- Recuero E., J. Cruzado-Cortés, G. Parra-Olea & K. R. Zamudio. 2010. Urban aquatic habitats and conservation of highly endangered species: the case of *Ambystoma mexicanum* (Caudata, Ambystomatidae). *Annales Zoologici Fennici* 47: 223-238.
- Shaffer, H. B. 1984. Evolution in a paedomorphic lineage. I. An electrophoretic analysis of the Mexican Ambystomatid salamanders. *Evolution* 38: 1194-1206.
- Shaffer, H. B. & M. L. McKnight. 1996. The polytypic species revisited: genetic differentiation and molecular phylogenetics of the Tiger Salamander *Ambystoma tigrinum* (Amphibia: Caudata) complex. *Evolution* 50: 417-433.
- Shaffer H. B., G. Parra-Olea, D. B. Wake & T. Burkhardt. 2010. *Ambystoma taylori*. En *IUCN 2013. IUCN Red List of Threatened Species, Version 2014.3*. Disponible en: www.iucnredlist.org.
- Taylor, E. H. 1943. A new ambystomatid salamander adapted to brackish water. *Copeia* 3: 151-156.
- Parra-Olea G., K. R. Zamudio, E. Recuero, X. Aguilar-Miguel, D. Huacuz & L. Zambrano. 2012. Conservation genetics of threatened Mexican axolotls (*Ambystoma*). *Animal Conservation* 15: 61-72.
- Percino-Daniel R., E. Recuero, E. Vázquez-Domínguez, K. R. Zamudio & G. Parra-Olea. 2016. All grown-up and nowhere to go. *Biological Journal of the Linnean Society* 118: 582-597.

Weisrock D. W., H. B. Shaffer, B. L. Storz, S. R. Storz & S. R. Voss. 2006. Multiple gene sequences identify phylogenetic species boundaries in the rapidly radiating clade of Mexican ambystomatid salamanders. *Molecular Ecology* 15: 2489-2503.

Zambrano L., E. Vega, M. Herrera, E. Prado & V.H. Reynoso. 2007. A population matrix model and population viability analysis to predict the fate of endangered species in highly managed water systems. *Animal Conservation* 10: 297-303.

Contacto

Gabriela Parra Olea. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Biología. A.P. 70-367. Ciudad Universitaria, C.P. 04500, Ciudad de México, México.
gparra@ib.unam.mx





El charal

Elsah Arce Uribe

Javier Alcocer

Xavier Chiappa-Carrara

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Chordata
Clase: Osteichthyes
Orden: Atheriniformes
Familia: Atherinopsidae
Género: *Poblana*
Especie: *Poblana alchichica* (De Buen 1945)
Nombre común: Charal de Alchichica

Los “charales”, peces atherinópsidos del género *Poblana* (Fig. 15.1) pertenecen a la subfamilia Menidiinae. Actualmente, se reconocen cuatro especies de este género y cada una es endémica del cuerpo acuático en el que habita (Álvarez 1950). El charal de Alchichica fue descrito por primera vez por Fernando De Buen (1945). Posteriormente, Álvarez (1950) y Guerra Magaña

(1986) consideraron al charal de Alchichica como una subespecie (*Poblana alchichica alchichica*). Sin embargo, Espinosa *et al.* (1993) ubican a *P. alchichica* como una especie, categoría que mantiene actualmente.

El charal de Alchichica (Fig. 15.2), es la única especie de pez que habita el lago Alchichica, Puebla, México (19°24' N, 97°24' O, 2345 m s.n.m.) de donde es endémico

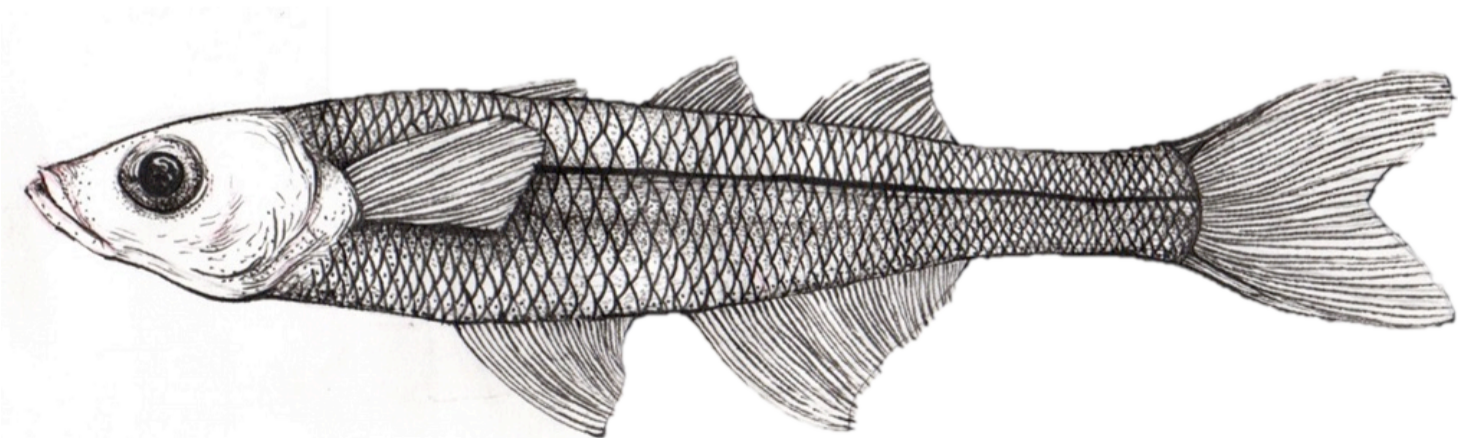


Figura 15.1. Esquema del charal de Alchichica *P. alchichica*. (Dibujo: Alexis Manuel De la Torre Zavala).



Figura 15.2. El charal de Alchichica *Poblana alchichica*. (Fotografía: Valeria Mas).

(Alcocer *et al.* 2009), de hecho, microendémico (Alcocer *et al.* 2010). De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana es una *especie en peligro de extinción* (NOM-059-ECOL-2001; SEMARNAT 2010) y *en peligro crítico* de acuerdo con la Lista Roja de Especies Amenazadas (IUCN 2008), considerando que el riesgo de extinción está rela-

cionado con la abundancia poblacional y la extensión del ámbito de distribución.

El tamaño poblacional del charal de Alchichica se estima entre 16,000 y 21,000 organismos mayores a un centímetro de longitud total en todo el lago (Alcocer *et al.* 2009). La temperatura del agua en la que habita es de $15.9 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ y los valores de la

concentración de oxígeno disuelto son mayores a 4 mg L^{-1} , misma que limita la distribución batimétrica de la especie, particularmente durante los periodos de estratificación del lago, en los que se ha observado una zona anóxica por debajo de la isóbata de los 40 m (ver capítulo *El cuerpo de agua*).

La longitud total de *P. alchichica* se sitúa típicamente alrededor de 50-60 mm, aunque se han obtenido organismos de casi el doble de talla con 11.5 mm (Fig. 15.3 C). Las tallas de los organismos varían en las diferentes zonas del lago. En la zona litoral (caracterizada por la presencia de estromatolitos) habitan los peces de ≤ 36 mm de longitud, que constituyen alrede-

dor del 70% de la abundancia total. En la zona pelágica se encuentran los peces de > 36 mm que corresponden a organismos adultos y constituyen el 30% de la población (Alcocer *et al.* 2010).

El charal de Alchichica tiene una estrategia de reproducción iterópara, esto es, que puede reproducirse varias veces durante su ciclo de vida. Presenta dos periodos de desove que abarcan de febrero a abril y de julio a septiembre. Los huevos se adhieren al sustrato por lo que esta especie requiere de la zona de estromatolitos que se encuentra en el ambiente litoral del lago para asegurar el éxito reproductivo. La distribución horizontal de los peces es acorde con esta conducta por lo que se



Figura 15.3. A) La Sra. Martha Hernández preparando los charales para ser cocinados; B) detalle de los charales recién capturados; C) el charal de Alchichica más grande que se ha encontrado. (Fotografía: Javier Alcocer).

han encontrado valores de abundancia más elevados en periferia del lago que en la zona pelágica. La densidad poblacional del charal de Alchichica se encuentra en el intervalo de 0.0091 a 0.0191 org m⁻² en la zona litoral y de 0.000015 a 0.0078 org m⁻² en la zona pelágica (Alcocer *et al.* 2010, Arce *et al.* 2011). Adicionalmente, las diferencias en las abundancias han sido atribuidas a una mayor abundancia y diversidad de presas en la zona litoral (Arce 2006), donde eclosionan las crías que se alimentan principalmente de las larvas de anfípodos y quironómidos presentes en esa zona (Flores-Negrete 1998). Esta especie no presenta cuidado parental (Flores-

Negrete 1998) por lo que las larvas, crías particularmente los juveniles utilizan como zona de refugio la vegetación formada por el “pasto marino” *Ruppia maritima* y los estromatolitos en donde forman cardúmenes.

P. alchichica está sujeta a una pesquería local por parte de pobladores de la zona y de comunidades aledañas. Los charales, son particularmente valorados por los pobladores locales como alimento, los cuales preparan fritos o en tamales (Fig. 15.3 A). La pesquería es artesanal y se lleva a cabo principalmente por mujeres que utilizan mantas, usadas a modo de chinchorro, con aperturas de malla incluso inferiores a 1 mm. Con ellas capturan a los



Figura 15.4. El charal de Alchichica *Poblana alchichica*. (Fotografía: Valeria Mas).



Figura 15.5. Pesca artesanal del charal de Alchichica en la zona litoral cerca de los estromatolitos. (Fotografías: Javier Alcocer).

peces en la zona litoral o de estromatolitos del lago formando grupos de pescadoras que suelen ser de tres personas.

Dos de ellas llevan un extremo de la manta atada al tobillo, con la finalidad de mantenerla pegada al fondo, mientras que el otro extremo se mantiene con la mano por arriba de la superficie. La tercera persona tiene doble función: camina al frente con un palo en cuyo extremo se han colocado tiras de tela para conducir a los peces hacia el centro de la manta, que termina en forma de copo. Asimismo, mantiene el arreglo y recoge la malla para evitar que se escapen los peces atrapados (Arce 2006, Fig. 15.5).

Además de la pesquería local, hay otras actividades humanas que impactan en el lago Alchichica y su biota. Algunas pozas que se forman en la zona litoral son utilizadas para el lavado de ropa y encerres domésticos, por lo que blanqueadores y detergentes se descargan en la zona litoral sin control. Hay aguas residuales domésticas que fluyen hacia el lago desde las casas vecinas y es probable que otros contaminantes, como pesticidas, fertilizantes e hidrocarburos lle-

guen al lago desde las tierras agrícolas circundantes, así como desde una estación de gasolina ubicada en las cercanías.

Hay una reducción evidente del nivel de agua del lago de Alchichica que se observa en una serie histórica de fotografías aéreas (1974-1995). Las marcas de nivel de agua de hace algunas décadas están muy por arriba del nivel actual por lo que una gran parte de los estromatolitos, anteriormente sumergidos, ahora están expuestos a la luz del sol, a la desecación y, obviamente, carecen de vida acuática (Alcocer y Escobar-Briones 2007).

La extracción de agua subterránea para riego y para el consumo humano es, sin duda, responsable del proceso de desecación del lago. La agricultura es una actividad muy importante y creciente en la cuenca, especialmente los cultivos de riego. Aunado a ello, los cambios en los patrones locales de precipitación debidos al cambio climático pueden alterar el régimen hidrológico de la cuenca modificando el hábitat necesario para conservar la única población existente de *P. alchichica*.

Agradecimientos

A Alexis Manuel De la Torre Zavala de la Facultad de Ciencias Biológicas, UAEM, por el dibujo de *P. alchichica* y a Valeria Mas por algunas de las fotografías incluidas en el presente capítulo.

Referencias

- Alcocer, J. & E. Escobar-Briones. 2007. On the ecology of *Caecidotea williamsi* Escobar-Briones & Alcocer (Crustacea: Isopoda: Asellidae) from Alchichica saline lake, Central Mexico. *Hydrobiologia* 576: 103-109.
- Alcocer, J., X. Chiappa-Carrara, E. Arce & L. Zambrano. 2009. Threatened fishes of the world: *Poblana alchichica* (de Buen, 1945) (Atheriniformes: Atherinopsidae). *Environmental Biology of Fishes* 85: 317-318.
- Alcocer, J., U. E. Arce, L. Zambrano & X. Chiappa-Carrara. 2010. *Poblana alchichica*: a threatened silverside species? *Verhandlungen des Internationalen Verein Limnologie* 30: 1429-1432.
- Alvarez, J. 1950. Contribution to the knowledge of the fishes of the los Llanos region, State of Puebla (Mexico). *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas México* 8: 81-107.
- Arce, U. E. 2006. Abundancia y distribución poblacional de *Poblana alchichica* (Pises: Atherinopsidae), charal endémico del lago Alchichica, Puebla. Tesis de Maestría, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. México. 58 pp.
- Arce, U. E., J. Alcocer, X. Chiappa-Carrara, & L. Zambrano. 2011. Hydroacoustic study of spatial and temporal distribution of *Poblana alchichica* (de Buen, 1945) in Lake Alchichica, Mexico. *Journal of Fisheries and Aquatic Science* 6: 624-632.
- De Buen, F. 1945. Investigations on Mexican ichthyology. I. Atherinidae from continental waters of Mexico. *Anales del Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México. Serie zoología* 16: 475-532.
- Espinosa, H., M. T. Gaspar & P. Fuentes. 1993. Fauna lists of Mexico. III. The Mexican freshwater fishes of Mexico. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Flores-Negrete E. 1998. Estudio poblacional de tres especies de *Poblana* (Pisces: Atherinopsidae) en tres lagos-cráter de Puebla, México. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias, UNAM. México. 101 pp.
- Guerra Magaña, C. 1986. Taxonomic and population analysis of atherinid fishes (*Chirostoma* and *Poblana*) from the endorheic basins of the southernmost portion of the Mexican highlands. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas México* 30: 81-113.
- Miller, R. R. 1986. Composition and derivation of the freshwater fish fauna of Mexico. *Anales de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas México* 30: 121-153.
- SEMARNAT. 2010. Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-2001, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo. Diario Oficial del 6 de Marzo de 2002. IUCN (2008) 2008 IUCN Red List of Threatened Species. www.iucnredlist.org

Contacto

Elsah Arce Uribe. Universidad Autónoma del Estado de Morelos, Centro de Investigaciones Biológicas. Laboratorio de Acuicultura e Hidrobiología, Río Pánuco No. 41, Colonia Vista Hermosa, Cuernavaca, Morelos, México.

Javier Alcocer. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical, Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.

Xavier Chiappa-Carrara. Universidad Nacional Autónoma de México, Escuela Nacional de Estudios Superiores, Unidad Mérida, Calle 7-B No. 227 por 20 y 22-A Colonia Juan B. Sosa, C.P. 97205, Mérida, Yucatán, México.
chiappa@unam.mx





El alga verde-azul

Rosaluz Tavera

Eberto Novelo

Karim Benzerara

Purificación López-García

David Moreira

Estelle Couradeau

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum: Cyanobacteria (Cyanoprokaryota)

Clase: Cyanophyceae

Orden: Gloeomargaritales

Familia: Gloeomargaritaceae

Género: *Gloeomargarita*

Especie: *Gloeomargarita lithophora* (Moreira, Tavera, Benzerara, Skouri-Panet, Couradeau, Gérard, Loussert Fonta, Novelo, Zivanovic y López-García 2017).

Nombre común: Alga verde-azul

Gloeomargarita lithophora es una cianobacteria o cianoprocarionte. Las cianobacterias fueron consideradas algas verde-azules en el pasado, porque en muchas especies es común su color peculiar, que incluye desde un tono azul turquesa hasta un tono verde esmeralda y porque al igual que algunas algas, que son sus descendientes, presentan fotosíntesis oxigénica. Actualmente se han separado de las algas por su comprobada cercanía genética con las bacterias, por lo que se les llama cianobacterias (bacterias azules) o cianoprocariontes (procariontes azules), pues como las bacterias y las arqueas, carecen de núcleo. Esta cianobacteria fue aislada a partir de muestras de microbiofilitos del lago Alchichica. Esta especie forma colonias mucilaginosas microscópi-

cas sin forma definida (Fig. 16.1 A). Las colonias se integran de numerosas células que presentan reproducción por división transversal solamente en un plano. Las células miden en promedio 1.1 μm de ancho y 3.9 μm de largo, son de forma cilíndrica alargada, rectas a curvas y están dispersas de manera irregular en un denso mucílago extracelular, separadas 5-10 micras unas de otras, aunque en cultivos de varias semanas de edad pueden llegar a unirse apretadamente y forman masas compactas que hacia el exterior se rodean de varias capas del mucílago denso (Fig. 16.1 B).

Estas masas se caracterizan por un acentuado color esmeralda que las haría fácilmente visibles en el ambiente, pero en condiciones naturales esta especie parece

ser muy escasa y su crecimiento abundante sólo se ha observado en condiciones de laboratorio. En estas condiciones se estableció experimentalmente que en cultivos en medio líquido el pH de crecimiento óptimo es de 8.0-8.5 a 25-30°C, mientras que en medio sólido las condiciones óptimas se observaron en un pH de 8.5 y una temperatura de 25-30°C, en ambos casos con baja intensidad de luz (flujo de fotones de 5-10 $\mu\text{moles m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

Gloeomargarita lithophora presenta numerosos rasgos comunes con otras cianobacterias, como la presencia de carboxisomas, que son microcompartimentos bac-

terianos limitados por una cubierta proteica y que contienen la enzima D-ribulosa 1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa, conocida como RubisCO, responsable de la capacidad de estos organismos para fijar el CO_2 . Esta enzima actúa en el carboxisoma solamente como carboxilasa, lo que aumenta la eficiencia de su función en la fijación del carbono (Cannon *et al.* 2001).

Otros rasgos típicos cianobacterianos son la presencia de tilacoides, que se disponen en la periferia de la célula, la función de la fotosíntesis oxigénica y la presencia de ficocianina como pigmento accesorio a la clorofila-a, el pigmento universal heredado por las plantas (Fig. 16.2).

La característica sobresaliente y que distingue a *G. lithophora* como una especie cianobacteriana nueva para la ciencia, es la presencia de numerosas inclusiones de carbonato en su citoplasma (Fig. 16.3). Estos carbonatos se depositan formando esferas brillantes de un tamaño entre 60 y 380 nanómetros de diámetro. Estas esferas están compuestas de carbonatos de calcio, bario, magnesio y estroncio, de los que el carbonato de calcio es el componente predominante cuando las aguas son ricas en calcio y magnesio y pobres en fósforo (Moreira *et al.* 2017). Su identificación ha sido reveladora en el conocimiento de las cianobacterias porque en este grupo la capacidad de precipitación de carbonatos solo se había identificado asociada al mucílago envolvente al exterior de la célula, es decir, como un proceso exclusivamente extracelular (Couradeau *et al.* 2012). En cianobacterias,

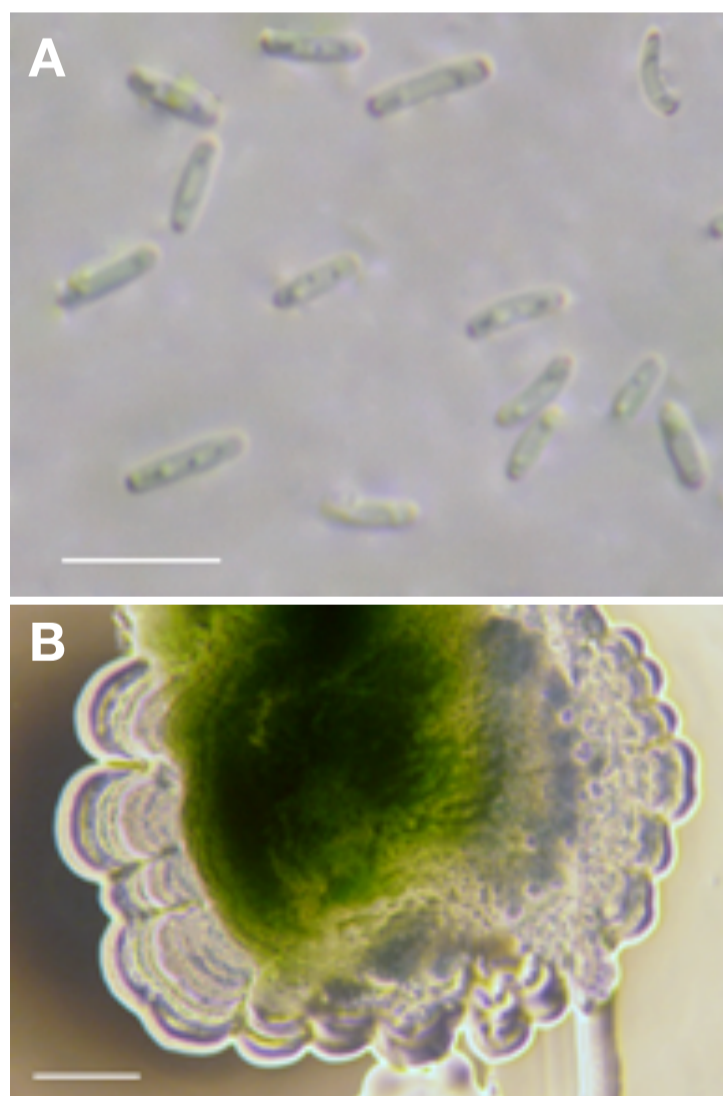


Figura 16.1. A) Células de *Gloeomargarita lithophora*. Contraste diferencial de interferencias. Barra=10 μm ; B) colonia verde esmeralda mostrando un borde denso translúcido. Microscopio estereoscópico. Barra = 20 μm .

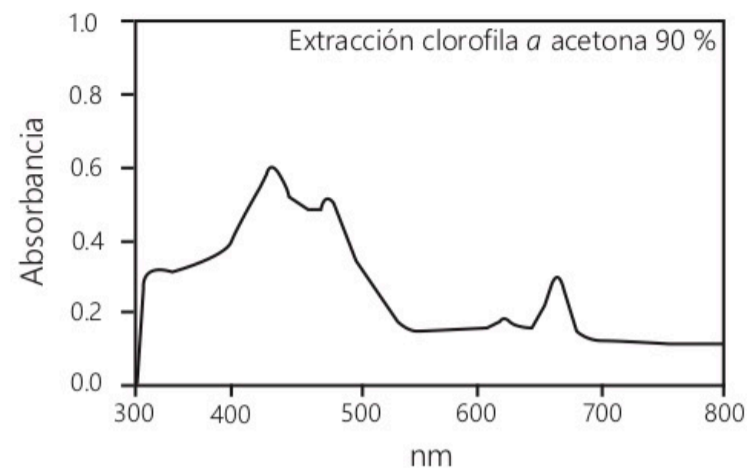
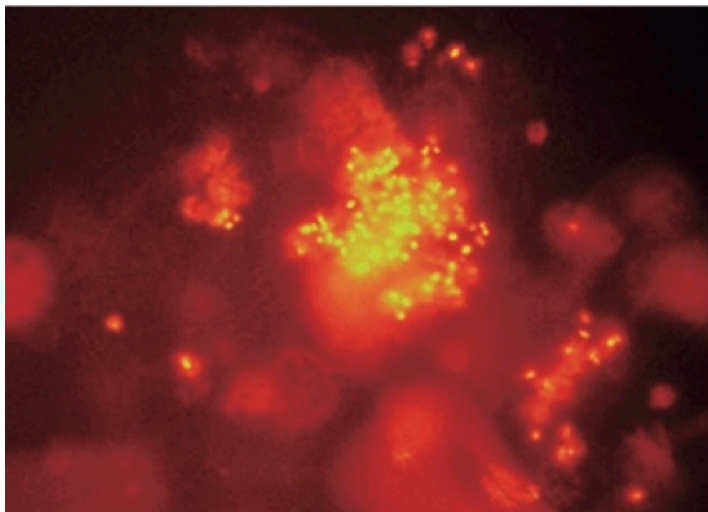


Figura 16.2. Cultivo de *G. lithophora* cepa D-10 en epifluorescencia. Microscopio fotónico con filtro de paso de banda 365 nm y filtro de barrera de corte de 418 nm para fluorescencia de clorofila-a y espectro de absorción de clorofila-a extraída del mismo cultivo.

la precipitación intracelular se identificó por primera vez en *G. lithophora*, pero ahora sabemos que está más ampliamente distribuida en otras cianobacterias (Benzerara *et al.* 2014, Ragon *et al.* 2014, Li *et al.* 2016) y que podría tener un papel importante en la formación de microbialitos como las del lago Alchichica (Benzerara *et al.* 2014).

La presencia de los minerales de carbonatos intracelulares no sólo modificó el panorama desde el punto de vista morfológico y fisiológico de las cianobacterias, sino también desde el punto de vista evolutivo y desde el punto de vista ecológico. En el contexto evolutivo, sugirió que la participación activa de las cianobacterias en la formación de microbialitos es más diversa de lo que se había pensado; asimismo, al profundizar en investigaciones estructurales finas, se han abierto avenidas interesantes sobre la evolución de procesos fisiológicos de estos organismos, como la posible asociación de los carboxisomas como centros de nucleación de los carbonatos intracelulares (Li *et al.* 2016).

En el contexto ambiental, se configuró una visión más precisa del papel que juega la biomineralización en los ambientes como el lago Alchichica, que se distingue por el depósito masivo de carbonatos en escala métrica, esto es, que abarcan tamaños de varios metros. Sin embargo, aún en depósitos que no llegan a esa talla, se ha observado que en algunos ambientes la formación de toba está esencialmente influenciada por procesos biológicos (biomineralización) y que los tapetes microbianos incorporan gran cantidad de cationes divalentes y pueden actuar como centros importantes de precipitación de minerales (Ritter *et al.* 2018).

La descripción de esta nueva especie del lago Alchichica incluyó la secuenciación completa de su genoma. El análisis filogenético de una colección de 59 genes conservados en bacterias mostró que *G. lithophora* constituye una línea muy antigua e independiente de cianobacterias (Moreira *et al.* 2017). Considerar la ubicación de este organismo en la filogenia de las cianobacterias

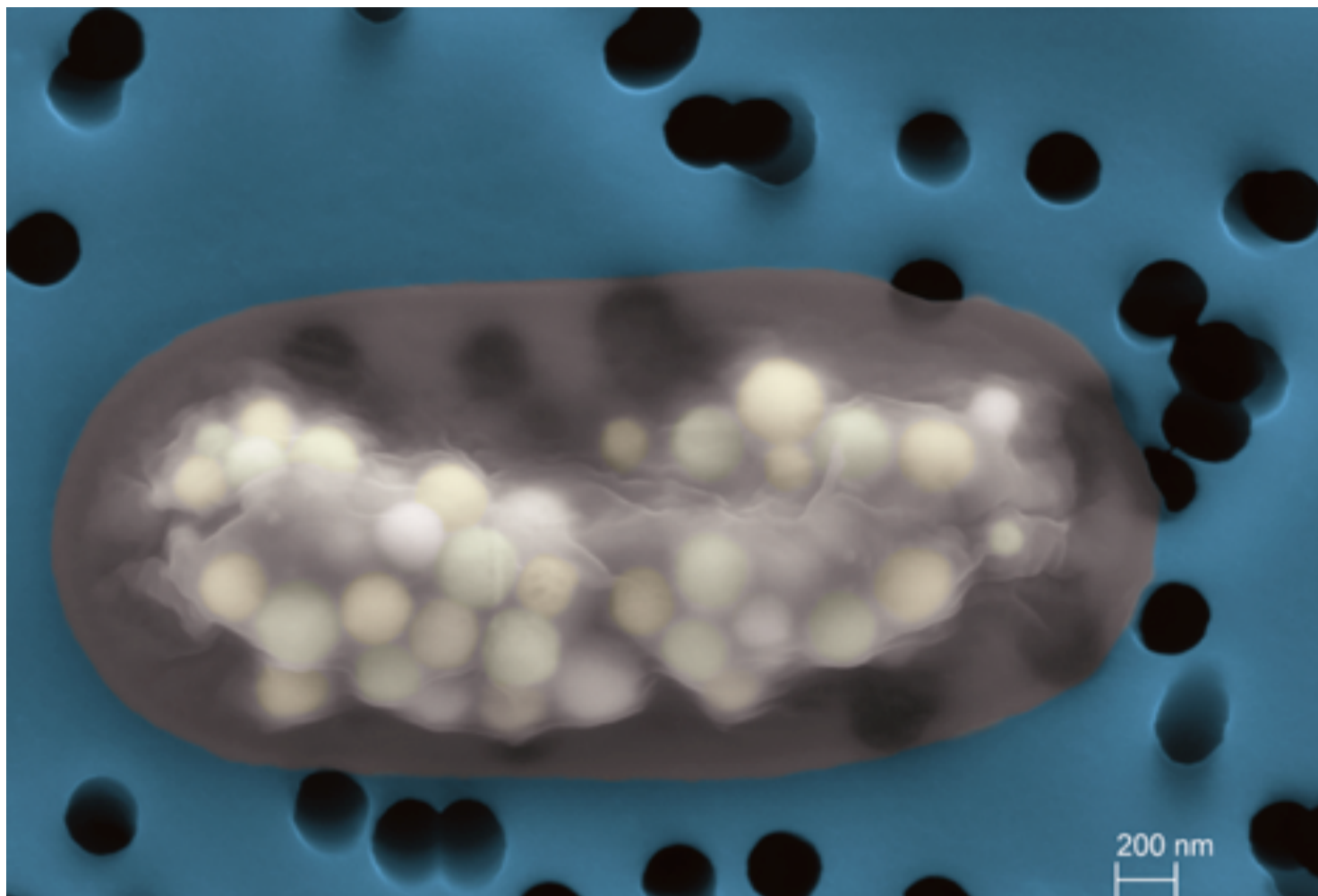


Figura 16.3. Imagen de microscopía electrónica de barrido (modo de electrones secundarios) de una célula de *Gloeomargarita lithophora*. Colores falsos. La célula (en gris) se depositó sobre un filtro de 0.22 μm de policarbonato (fondo azul). Se pueden observar abundantes inclusiones de carbonato (Ca, Mg, Sr, Ba) en la célula como gránulos de color amarillo a blanco.

y sus características tan particulares, ameritó el establecimiento de un género nuevo, *Gloeomargarita*, de *gloios*, sustantivo griego que significa sustancia glutinosa y *margarita*, sustantivo latino que significa perla, en alusión a los brillantes depósitos minerales esféricos. Se nombró así una especie nueva, *lithophora*, haciendo referencia a la presencia de inclusiones minerales en su citoplasma. Dadas las características morfológicas y genéticas de esta especie, fue necesaria la constitución de una familia y orden nuevos, Gloeomargaritaceae y Gloeomargaritales (Moreira *et al.* 2017).

Este nuevo linaje de cianobacterias ha resultado tener también una importancia

capital en la evolución de la fotosíntesis eucariótica (algas y plantas). Si al final de la década de 1970 se estableció sin lugar a dudas que el cloroplasto eucariótico (el orgánulo que realiza la fotosíntesis en algas y plantas) deriva de antiguas cianobacterias endosimbiontes, nunca se había identificado con certeza el tipo de cianobacteria ancestral al cloroplasto. El análisis filogenético de múltiples genes comunes a cianobacterias y a eucariotas fotosintéticos permite concluir que el ancestro del cloroplasto era una cianobacteria perteneciente al linaje de *Gloeomargarita* (Ponce-Toledo *et al.* 2017).

Gloeomargarita lithophora es uno de los protagonistas importantes en Alchichica por

su biología tan novedosa y por su asociación con las microbialitos. La conservación de este ecosistema es una prioridad indiscutible porque se conoce que este organismo tan especial puede tener un desarrollo frágil. Esta observación estimula la conciencia colectiva de la responsabilidad que se cuenta como habitantes del planeta con la capacidad de dirigir su destino. Se espera que al explicar y resaltar la importancia de la biota de Alchichica se diseñen las rutas a seguir para desarrollar esta conciencia.

Agradecimientos

A los proyectos ERC Advanced Grants “Protistworld” para Purificación López-García (322669) y “Plast-Evol” para David Moreira (787904). Al proyecto European Research Council under European Community’s Seventh Framework Programme FP7/2007-2013 Grant 307110, ERC CALC-YAN para Karim Benzerara.

Referencias

- Benzerara, K., F. Skouri-Panet, J. Li, C. Férrer, M. Gugger, T. Laurent, E. Couradeau, M. Ragon, J. Cosmidis, N. Menguy, I. Margaret-Oliver, R. Tavera, P. López-García & D. Moreira. 2014. Intracellular Ca-carbonate biomineralization is widespread in Cyanobacteria. *Proceedings of the National Academy of Sciences. PNAS* 111: 10933-10938.
- Cannon, G. C., C. E. Bradburne, H. C. Aldrich, S. H. Baker, S. Heinhorst & J. M. Shively 2001. Microcompartments in Prokaryotes: Carboxysomes and related polyhedra. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 5351-5361.
- Couradeau, E., K. Benzerara, E. Gérard, D. Moreira, S. Bernard, G. E. Brown Jr., P. López-García. 2012. An Early-Branching Microbialite Cyanobacterium Forms Intracellular Carbonates. *Science* 336: 459-462.
- Li, J., I. M. Oliver, N. Cam, T. Boudier, M. Blondeau, E. Leroy, J. Cosmidis, F. Skouri-Panet, J.M. Guigner, C. Férrer, M. Poinot, D. Moreira, P. López-García, C. Cassier-Chauvat, F. Chauvat & K. Benzerara. 2016. Biomineralization Patterns of Intracellular Carbonatogenesis in Cyanobacteria: Molecular Hypotheses. *Minerals* 6: 1-14; doi:10.3390/min6010010
- Moreira, D., R. Tavera, K. Benzerara, F. Skouri-Panet, E. Couradeau, E. Gérard, C. Loussert, E. Novelo, Y. Zivanovic & P. López-García 2017. Description of *Gloeomargarita lithophora* gen. nov., sp. nov., a thylakoid-bearing basal branching cyanobacterium with intracellular carbonates, and proposal for Gloeomargaritales ord. nov. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 67: 653-658.
- Ponce-Toledo, R. I., P. Deschamps, P. López-García, Y. Zivanovic, K. Benzerara, & D. Moreira. 2017. An early-branching freshwater cyanobacterium at the origin of chloroplasts. *Current Biology* 27: 386-391.
- Ragon, M., K. Benzerara, D. Moreira, R. Tavera & P. López-García 2014. 16S rDNA-based analysis reveals cosmopolitan occurrence but limited diversity of two cyanobacterial lineages with contrasted patterns of intracellular carbonate mineralization. *Frontiers in Microbiology* 5: 331.
- Ritter, S. M., M. Isenbeck-Schröter, A. Schröder-Ritzrau, C. Scholz, S. Rheinberger, B. Höfle & N. Frank. 2018. Trace element partitioning in fluvial tufa reveals variable portions of biologically influenced calcite precipitation. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 225: 176-191.

Contacto

Rosaluz Tavera. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Ciudad de

México, México.

r_tavera@ciencias.unam.mx

Eberto Novelo. Universidad Nacional Autónoma de México. Facultad de Ciencias. Ciudad de México, México.

Karim Benzerara. Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux, et de Cosmochimie, Sorbonne Universités-UPMC Univ Paris 06, CNRS UMR 7590, MNHN, IRD UMR 206, Paris, Francia.

Purificación López-García. Nestlé Research Center, Minerals and Imaging Group, P.O Box 44, Ch-1000 Lausanne 26, VD, Suiza.

David Moreira. Unité d'Ecologie, Systématique et Evolution, CNRS UMR 8079, Université Paris-Sud/Paris-Saclay, AgroParisTech, 91400 Orsay, Francia.

Estelle Couradeau. Institut de Minéralogie, de Physique des Matériaux, et de Cosmochimie, Sorbonne Universités-UPMC Univ Paris 06, CNRS UMR 7590, MNHN, IRD UMR 206, Paris, France/ Unité d'Ecologie, Systématique et Evolution, CNRS UMR 8079, Université Paris-Sud/Paris-Saclay, AgroParisTech, 91400 Orsay, Francia.





Los texcales

Patricia M. Valdespino-Castillo

Rocío J. Alcántara-Hernández

Luisa I. Falcón

CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

Phylum dominante: Proteobacteria, Cyanobacteria, Bacteroidetes, Firmicutes y Planctomycetes.

Clases dominantes: Alfa- Beta- y Gammaproteobacteria; Cyanophyceae; Planctomycetacia; Actinobacteria.

Ordenes dominantes: Alfaproteobacteria (Rhodospirillales, Rhodobacterales, Sphingomonadales, Rhizobiales); Gammaproteobacteria (Pseudomonas, Chromatiales), Betaproteobacteria (Burkholderiales), Cyanophyceae (Oscillatoriales, Gleobacterales, Chroococcales, Nostocales).

Nombre común: Texcales, microbialitos, estromatolitos.

Un rasgo emblemático y característico del lago Alchichica es un anillo de “rocas blancas” que se aprecia en casi toda la periferia del lago. Estas “rocas” se denominan localmente como “texcales” que literalmente quiere decir piedras en náhuatl, y no sólo otorgan una vista hermosa, sino que también son la huella de una reserva única de diversidad microbiana del lago. Esto es porque la formación de estas rocas es mediada por microorganismos (seres vivos microscópicos), como bacterias y arqueas que crecen en condiciones muy específicas. Este anillo en color blanco es entonces un conjunto de rocas sedimentarias de carbonatos de calcio y magnesio que han quedado expuestas al descender el nivel del agua del lago. Bajo el agua, las mismas rocas tiene una delgada capa viva de color verde oscu-

ro o café pardo, dependiendo de la profundidad a la que se encuentran (Fig. 17.1).

Esta cubierta pigmentada está integrada por los microorganismos que van formando la estructura mineral (blanca) carbonatada. A este conjunto mineral-microbiano se le llama microbialito, se desarrolla en pocos sistemas acuáticos del mundo tanto marinos como en aguas continentales. La actividad microbiana de estas comunidades es fácil de notar ya que producen burbujas en el día, mayormente oxígeno (O₂), debido a la fotosíntesis de las cianobacterias y microalgas. A las evidencias fósiles de estas comunidades microbianas-minerales se les conoce como estromatolitos.

Así, técnicamente los microbialitos son depósitos organo-sedimentarios formados por la actividad de comunidades

microbianas que viven en el lecho de los cuerpos de agua (bentos). Las comunidades que forman estas estructuras poseen una gran diversidad de especies (diversidad filogenética) y de rutas metabólicas. La capacidad de estos microbios para mediar o inducir la precipitación de minerales es una característica única de estas comunidades, por ello, el estudio de los microbialitos de Alchichica es objeto de recientes proyectos científicos de ecología microbiana, metagenómica funcional, biogeoquímica, geobiología, evolución y astrobiología (Kaźmierczak *et al.* 2011, Beltrán *et al.* 2012, Centeno *et al.* 2012, 2016, Cerqueda y Falcón 2016, Alcántara-Hernández *et al.* 2017, Valdespino-Castillo *et al.* 2017, 2018).

¿Cuál es la biodiversidad asociada a los microbialitos?

La descripción de la diversidad microbiana de los dominios Bacteria y Arquea se realiza, en general, a partir de comparar la similitud de su huella de ADN (en particular, al usar las secuencias del gen ribosomal 16S rARN) con secuencias conocidas de bases de datos generales (por ejemplo, GenBank). Haciendo este tipo de análisis se ha reportado que las bacterias que forman los microbialitos del lago son muy diversas y que muchas de ellas sólo han sido reportadas para este lago, es decir, son endémicas del lago Alchichica (ver capítulo *El alga verde-azul*). Se han descrito dos tipos de microbialitos en el lago Alchichica: morfotipos columnar y esponjoso. El morfotipo esponjoso es el más

abundante, y se ha mostrado que las comunidades microbianas de ambos son distintas a nivel de especie y tienen un funcionamiento biogeoquímico distinto; pero se parecen mucho a nivel de Filo y Clase (Figs. 17.2 y 17.3) (Centeno *et al.* 2012, Valdespino-Castillo *et al.* 2018). La composición mineral asociada a las comunidades microbianas de ambos tipos de microbialitos también es distinta, ya que el mineral dominante en el tipo esponjoso es la hidromagnesita, un carbonato de calcio y magnesio; mientras que, en el tipo columnar predominan los carbonatos de calcio como la calcita y la aragonita (Kaźmierczak *et al.* 2011, Valdespino-Castillo *et al.* 2018).

Actualmente se sabe que los microbialitos del lago Alchichica se distribuyen desde la superficie hasta aproximadamente 30 m de profundidad (Águila Salgado 2018). Sus particularidades mineralógicas y las especies de microbios que pueden sobrevivir en este ambiente con poca luz y en periodos con poco oxígeno están siendo investigados actualmente. En el caso del microbialito esponjoso, la composición de cianobacterias es diferente conforme a la profundidad.

Por ejemplo, en superficie y hasta 3 m, las cianobacterias más abundantes son Synechococcales y Nostocales, mientras que las Pleurocapsales se encuentran en todas las profundidades y son el orden dominante a profundidades de 30 m (Águila Salgado 2018).

Los estudios de biogeografía de microbialitos que incluyen a los dos morfotipos

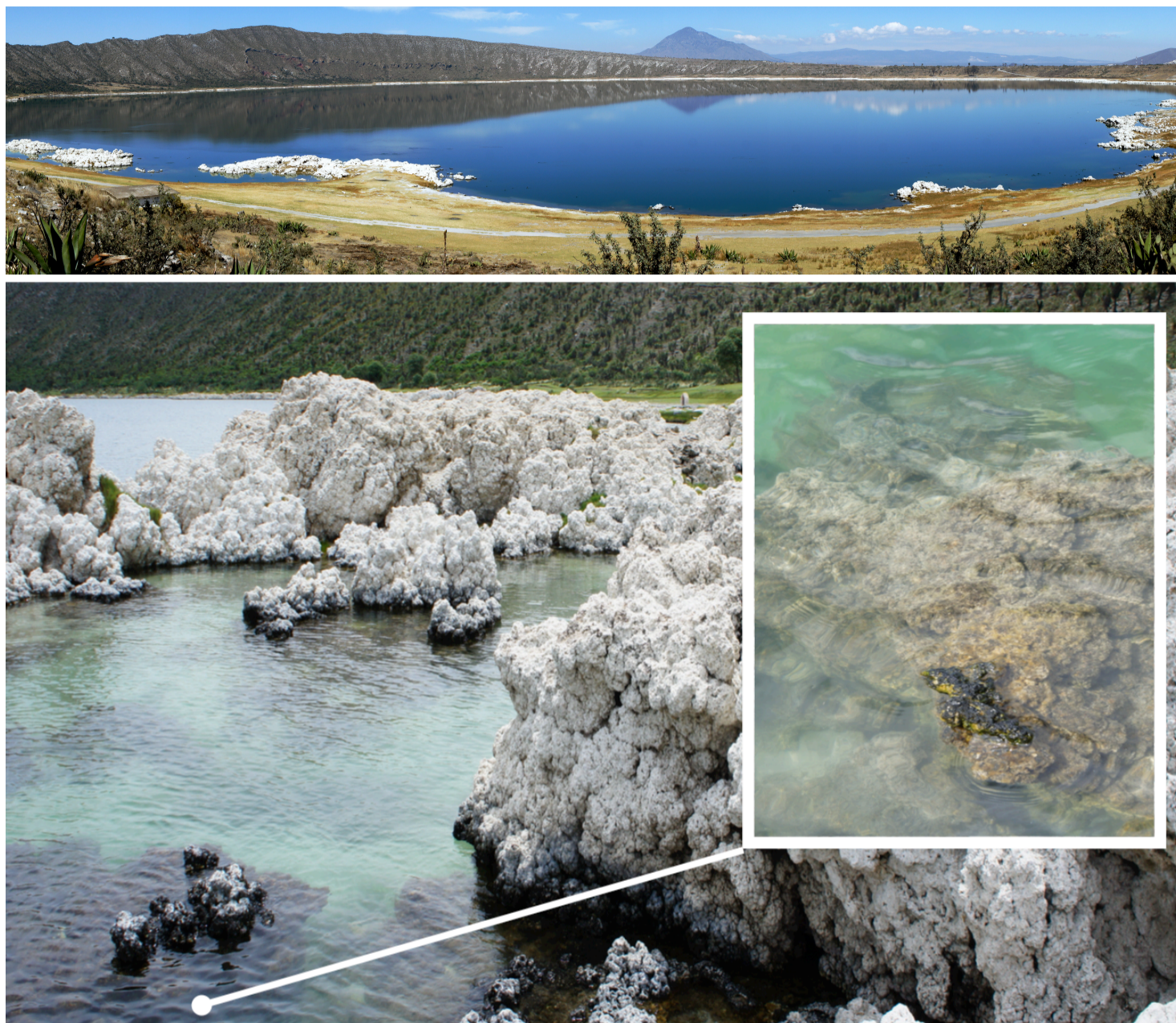


Figura 17.1. Arriba se observa una vista panorámica de los microbialitos del lago Alchichica: litificaciones minerales blancas características en la periferia del lago. Abajo se muestra una vista más cercana de los microbialitos superficiales emergidos (litificaciones blancas carbonatadas) y sumergidos (de coloración verde o café pardo). (Fotografías: Patricia M. Valdespino-Castillo).

del lago Alchichica (Centeno *et al.* 2012, Valdespino-Castillo *et al.* 2018) indican que, aún cuando la composición mineral de ambos morfotipos es distinta, su composición biológica es más similar entre los morfotipos columnar y esponjoso que con microbialitos de otras regiones de México (por ejemplo, los de la Cuenca de Cuatro Ciénegas, Coahuila o los presentes en las costas de la península de Quintana Roo) y de otras partes del mundo, como en Australia. La comparación de microbialitos de

distintas zonas de México reveló que las variables ambientales que parecen influir más en su diversidad microbiana son el pH y la conductividad (Centeno *et al.* 2012).

Y es que las aguas del lago Alchichica tienen características únicas, como pH alcalino y alta conductividad, comparado con muchos otros cuerpos de agua dulce. Estas condiciones poco frecuentes influyen de forma determinante en la formación de los microbialitos.

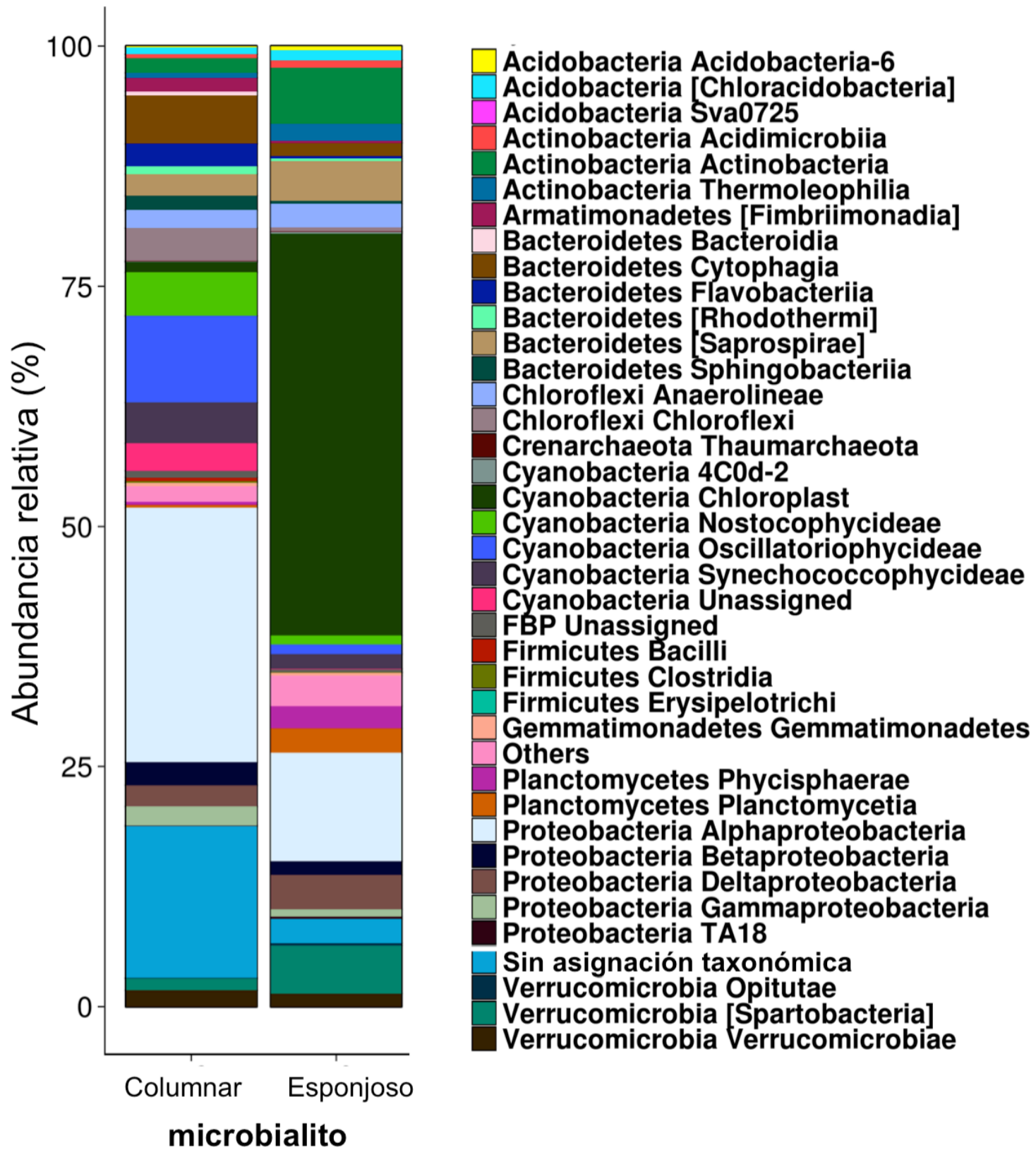


Figura 17.2. Composición microbiana comparada de los microbialitos columnar y esponjoso del lago Alchichica. Los diferentes grupos microbianos están representados en abundancias relativas (en porcentaje) a nivel taxonómico Filo y Clase (modificado de Valdespino-Castillo *et al.*, 2018).

¿Qué hacen los microbialitos?

Los microbialitos de Alchichica han sido ampliamente estudiados en términos de las especies que los forman y de las funciones ecológicas que llevan a cabo (Fig. 17.4). Ambas características están estrechamente vinculadas con el reciclaje y transformación de los elementos principales de la vida, tales como el carbono, el nitrógeno, el fósforo y el azufre, además de algunos metales traza. Estos elementos circulan en los ciclos biogeoquímicos por los compartimientos vivos (es decir, los seres vivos) y por los no vivos (atmósfera, litósfera e hidrósfera). Por lo tanto, no sólo están relacionados con la productividad y la biodiversidad del lago, sino también con la calidad del agua, el aire y los sedimentos, ya que un exceso de estos elementos resulta en la contaminación y eutrofización (exceso de nutrientes) de los cuerpos acuáticos.

Nitrógeno

En términos funcionales, los microbialitos de Alchichica fijan nitrógeno atmosférico; es decir, toman el nitrógeno inorgánico del aire y lo incorporan en tejidos orgánicos mayormente durante las horas de luz (Falcón *et al.* 2002, Beltrán *et al.* 2012). Este tipo de comportamiento se asocia a cianobacterias Nostocales, que al tener heterocistos (células especializadas para fijar nitrógeno) pueden llevar a cabo esta función. Además de fijar nitrógeno, Alcántara-Hernández *et al.* (2017) demostraron que las

Proteobacterias de los microbialitos de Alchichica tienen el potencial para transformar nitratos en nitrógeno gaseoso (desnitrificación), regresando el nitrógeno disuelto a la atmósfera y cerrando el ciclo del N.

El proceso de desnitrificación también se estudia ampliamente en las plantas de tratamientos de aguas residuales para eliminar las fuentes de nitrógeno que contaminan los cuerpos acuáticos superficiales y subterráneos. El estudio de los microbialitos es entonces, también útil como modelo de biorremediación (en reactores biológicos) para dar un tratamiento final al agua (tratamiento terciario o cuaternario), y remover nitratos y algunos metales (Zhu y Dittrich 2016).

Fósforo

Valdespino-Castillo *et al.* (2014, 2017) mostraron una amplia diversidad de marcadores genéticos relacionados al reciclaje del fósforo en los microbialitos, evidenciando su capacidad para transformar la materia orgánica para hacer disponible este elemento que potencialmente limita la fotosíntesis y en general, la formación de biomasa cuando el lago se mezcla (ver capítulo *El cuerpo de agua*). Este potencial fue relacionado a grupos bacterianos que incluyen a Actinobacteria, Alfa, Beta y Gammaproteobacteria, y Bacteroidetes.

Azufre

El ciclaje del azufre es fundamental en los microbialitos ya que se ha planteado que

este elemento es importante en la precipitación de minerales carbonatados por la acción de bacterias reductoras del azufre. Además, existen microorganismos del grupo de los Chromatiales que realizan procesos que requieren luz y compuestos de azufre que son vitales en el ensamblaje microbiano. El azufre es un elemento relevante en los ecosistemas acuáticos asociados a sistemas volcánicos, como muchos de los que existen en México. A la fecha hay muy pocos estudios de diversidad genética asociada al reciclaje del azufre en el lago Alchichica (por ejemplo, Torres Huesca 2018).

Carbono

Durante los últimos años se estudia con gran interés la capacidad de los microbialitos para "atrapar o secuestrar" el carbono

atmosférico en estructuras geológicamente más estables como los carbonatos. Debido a los altos niveles de dióxido de carbono en la atmósfera —que contribuyen al cambio climático planetario (Bernstein *et al.* 2008)—, los microbialitos podrían mostrarnos cómo atenuar la concentración del dióxido de carbono atmosférico mediante su secuestro por largos periodos de tiempo. Se ha planteado que la asociación entre los organismos fotosintéticos (por ejemplo, cianobacterias) y las bacterias que participan en el ciclo del azufre (como las sulfato-reductoras) es clave para la precipitación de minerales carbonatados. Por ello, el estudio de los microbialitos es crucial para revelar el papel funcional de cada uno de los microbios implicados.



Figura 17.3. En los microbialitos emergidos del lago Alchichica se pueden apreciar diferencias estructurales a simple vista, por ejemplo en el tipo esponjoso (arriba; predomina el mineral hidromagnesita) y en el tipo columnar (abajo; predominan los minerales calcita y aragonita). (Fotografías: Patricia M. Valdespino-Castillo).

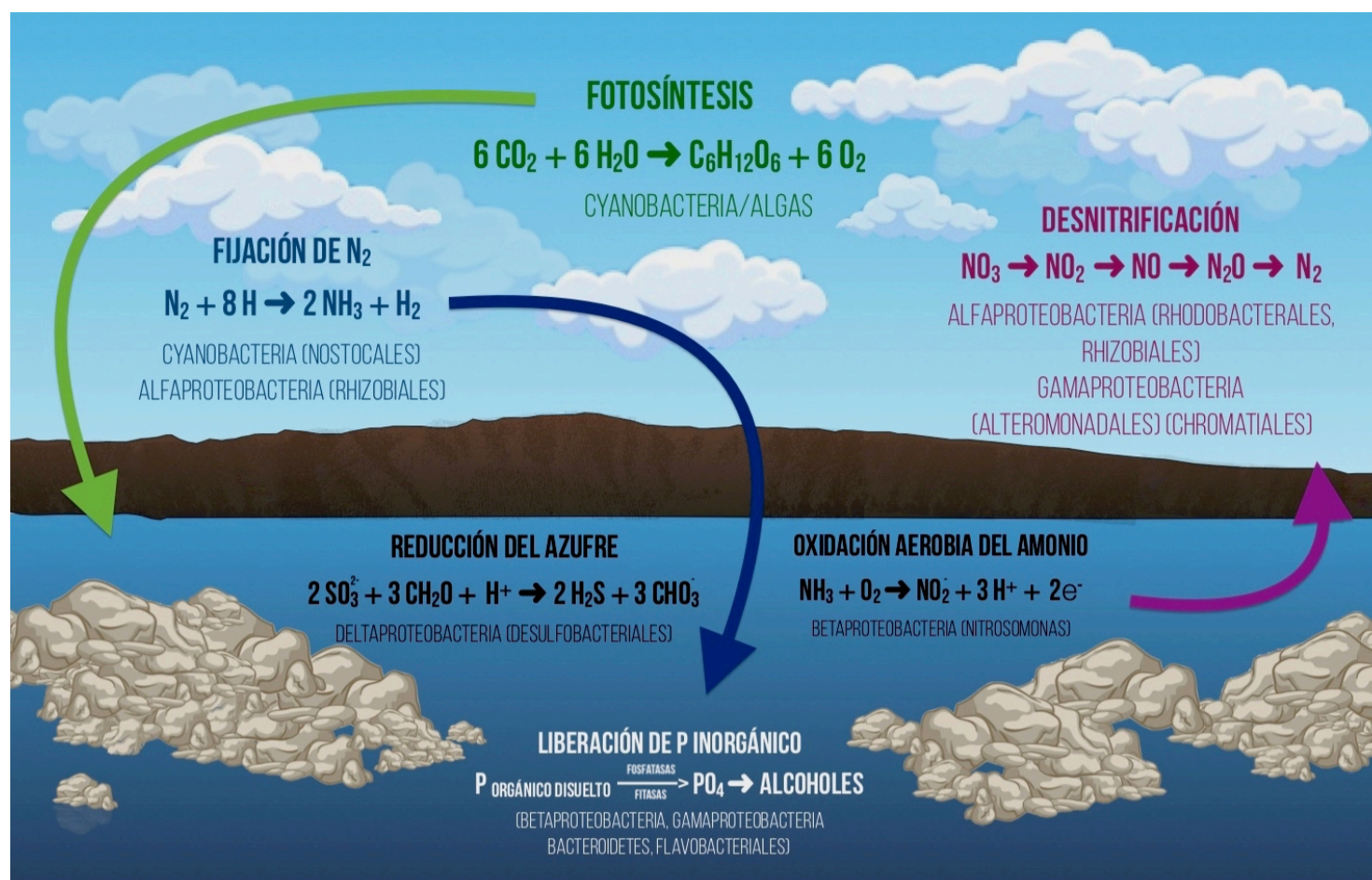


Figura 17.4. Papel funcional de los microbialitos en el lago cráter Alchichica en relación con el ciclaje de los principales elementos de la vida (C, N, P y S) (Diseño: Patricia M. Valdespino-Castillo y Mariana Vargas-Sánchez).

Asimismo, los microbialitos son modelos de estudio para entender a las primeras formas de vida en el planeta. Hay ejemplos de microbialitos en sistemas marinos y epicontinentales que mantienen similitud estructural (y funcional) con los registros de vida fósiles más antiguos (estromatolitos del periodo Arqueano fechados en ~3,500 millones de años; Schopf 2007). Sin embargo, el significado evolutivo de su estudio no se limita al pasado geológico (para el estudio del origen de la vida en el planeta), sino que puede aportar elementos para la colonización de ambientes extremos (como la terraformación de Marte).

Si bien se ha empezado a conocer la identidad y la distribución de las comuni-

dades microbianas en los microbialitos en las últimas décadas, aún falta explorar su riqueza genética y metabólica, la cual puede aportar elementos para mitigar el cambio climático o bien, para desarrollar tecnología en diferentes áreas (por ejemplo, para el tratamiento de aguas contaminadas o para la inmovilización del carbono en materiales minerales, etc.). Además, los microbialitos son sistemas excelentes para entender procesos como la biomineralización o las adaptaciones a condiciones extremas como la alta alcalinidad o concentraciones bajas de nutrientes; condiciones que sólo ocurren en algunos ecosistemas, por ejemplo, en los lagos del Altiplano Mexicano.

A pesar de su potencial científico y tecnológico, los microbialitos no cuentan con ninguna categoría de protección en México. La desecación del lago Alchichica y de los lagos del Altiplano Mexicano son amenazas presentes, así como los procesos de contaminación de los sistemas acuáticos con compuestos ricos en nitrógeno, fósforo y/o xenobióticos empleados en la agricultura, como los pesticidas. Por esto es importante y urgente formular regulaciones que permitan su conservación mediante la preservación de los sistemas acuáticos en los que se encuentran.

Agradecimientos

Agradecemos a L. A. Oseguera, O. Gaona, S. Castillo y A. Cruz por su asistencia técnica. SEP-CONACyT (151795, 254962), PAPIIT-UNAM (202016-3, IA209516), UC MEXYS-CONACYT (CN116) han financiado nuestra investigación. P. Valdespino recibió una beca posdoctoral de UC-MEXUS.

Referencias

- Águila Salgado, B. 2018. Caracterización de microbialitas del lago cráter Alchichica en un gradiente de profundidad. Tesis de Maestría. Posgrado en Ciencias Biológicas, UNAM. 69 pp.
- Alcántara-Hernández, R. J., P. M. Valdespino, CM. Centeno, J. Alcocer, M. Merino-Ibarra, & L. I. Falcón. 2017. Genetic diversity associated to N cycle pathways in microbialites from Lake Alchichica, Mexico. *Aquatic Microbial Ecology* 78: 121-133.
- Beltrán, Y., C. M. Centeno, F. García-Oliva, P. Legendre, & L. I. Falcón. 2012. Nitrogenase activity and associated diversity of microbialite and mat-forming communities from different environments in Mexico. *Aquatic Microbial Ecology* 67: 15-24.
- Bernstein, L., P. Bosch, O. Canziani, Z. Chen, R. Christ & K. Riahi. 2008. IPCC, 2007: climate change 2007: synthesis report.
- Centeno, C. M., P. Legendre, Y. Beltrán, R. J. Alcántara-Hernández, U. Lidstrom, M. N. Ashby & L. I. Falcón. 2012. Patterns in microbialite genetic composition relate to environmental variables. *FEMS Microbiology Ecology* 82: 724-735.
- Centeno C. M., O. Mejía & L. I. Falcón. 2016. Habitat filtering drives phylogenetic structure of dominant bacterial phyla from microbialite communities in different locations across Mexico. *Revista de Biología Tropical* 64: 3 p.
- Cerqueda-García D. & L. I. Falcón. 2016. Metabolic potential of microbial mats and microbialites: autotrophic capabilities described by an in silico stoichiometric approach from shared genomic resources. *Journal of Bioinformatics and Computational Biology* 1650020.
- Falcón, L. I., E. Escobar-Briones & D. Romero. 2002. Nitrogen fixation patterns displayed by cyanobacterial consortia in Alchichica crater-lake, Mexico. *Hydrobiologia* 467: 71-78.
- Kaźmierczak, J., S. Kempe, B. Kremer, P. López-García, D. Moreira & R. Tavera. 2011. Hydrochemistry and microbialites of the alkaline crater lake Alchichica, Mexico. *Facies* 57: 543-570.
- Schof, J. W., A. B. Kudryavtsev, A. D. Czaja, A. B. Tripathi. 2007. Evidence for Archean life: Stromatolites and microfossils. *Precambrian Research* 158: 141-155.
- Torres Huesca, J. 2018. Detección y caracterización molecular de las bacterias sulfato reductoras en microbialitas de un lago cráter alcalino de México. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología, UNAM. 74 pp.

- Valdespino-Castillo, P. M., R. J. Alcántara-Hernández, J. Alcocer, M. Merino-Ibarra, M. Macek, & L. I. Falcón. 2014. Alkaline phosphatases diversity of microbialites and bacterioplankton in Alchichica soda lake. *FEMS Microbiology Ecology* 90: 504-519
- Valdespino-Castillo P. M., R. J. Alcántara-Hernández, M. Merino-Ibarra, J. Alcocer, M. Macek, O. Moreno-Guillén & L. I. Falcón. 2016. Phylotype dynamics of bacterial P utilization genes in microbialites and bacterioplankton of a monomictic endorheic lake. *Microbial Ecology* 73: 296-309.
- Valdespino-Castillo P. M. P. Hu, M. Merino-Ibarra, L. M. López-Gómez, D. Cerqueda-García, R. González-De Zayas, T. Pi-Puig, J. A. Lestayo, H. Y. N. Holman & L. I. Falcón. 2018. Exploring biogeochemistry and microbial diversity of extant microbialites in Mexico and Cuba. *Frontiers in Microbiology* 9: 510.
- Zhu, T. & M. Dittrich. 2016. Carbonate Precipitation through Microbial Activities in Natural Environment, and Their Potential in Biotechnology: A Review. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 4: 4.

Contacto

Patricia M. Valdespino-Castillo. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Laboratorio de Ecología Bacteriana. Circuito Exterior S/N anexo Jardín Botánico exterior, Ciudad Universitaria, C.P. 04500, Ciudad de México, México.
pvaldespino@ibl.gov

Rocío J. Alcántara-Hernández. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Geología. Laboratorio de Microbiología Funcional. Ciudad Universitaria, C.P. 04510, Ciudad de México, México.

Luisa I. Falcón. Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Ecología. Laboratorio de Ecología Bacteriana. Circuito Exterior S/N anexo Jardín Botánico exterior, Ciudad Universitaria, C.P. 04500, Ciudad de México, México.





Leyendas, mitos y tradiciones

Verónica A. Arellano Peralta

Ángel Arellano Peralta

Javier Alcocer

En un punto cercano a la frontera de los estados de Puebla y Veracruz, la carretera federal 140 esconde una sorpresa. El árido paisaje de cerros con poca vegetación, magueyes y negocios de fabricación de cajas y carrocerías para camión se rompe en el kilómetro 76. Conforme se avanza en el camino, de a poco se revela un lago con tonalidades azules y verdes salpicado de blancos cuerpos rocosos que los lugareños llaman “texcales” y que conforman un anillo discontinuo que rodea al lago, cercano a la orilla (ver capítulo *Los texcales*).

El lago puede apreciarse en su totalidad desde la orilla de la carretera o si se para en el mirador de la gasolinera ubicada al borde del cráter volcánico dentro del cual se formó ese cuerpo de agua (ver capítulo *Origen y formación del cráter*). Quienes viven y trabajan en las cercanías del lago, se muestran tan acostumbrados a él que parecen ignorarlo. No hay nadie en la playa y da la impresión de que tampoco nadie se percata de su hermosura, pero la realidad es otra pues, la gente que vive ahí, y la de los pueblos cercanos, no le llama lago sino laguna, la laguna de Alchichica.

Entre mayo y septiembre las personas que viven en los pueblos de Itzoteno, Techachalco o San José acuden a buscar el “charal” de Alchichica, una especie de pez

que sólo se encuentra ahí (ver capítulo *El charal*). Para ello, usan sábanas a manera de redes para pescarlo. Tradicionalmente, dos señoras se atan dos extremos de la sábana a los tobillos y los otros dos los toman con las manos mientras van arrastrando la red pegada al fondo. Dos personas más van al frente moviendo dos palos con trapos amarrados en el extremo para espantar a los peces y encaminarlos al centro de la red, donde son capturados. Al tiempo, cuando tienen suficientes peces los destripan con los dedos y los lavan. Después colocan algunos en una hoja de maíz para hacer un tamal; añaden epazote, sal, chile verde o chile de árbol picados y los ponen a tostar en el comal; estos son los localmente famosos y muy apreciados tamales de charal.

Algunos lugareños suelen llevar su escopeta a la laguna de Alchichica por si ven un pato o un conejo. Otros la llevan por seguridad porque ya no es como antes, cuando se podía caminar sin otra preocupación que no fuera la de tener la fatal desgracia de ser mordido por una víbora de cascabel o pisar un “tencholote” que es un cactus en forma de bolita lleno de enormes espinas.

Así era hace 75 años, en la década de los cuarenta. No había tantos coches. Es probable que la gasolinera ni siquiera existiera. La gente llegaba a la laguna de Alchichica en

bicicleta o en carretón, un transporte hecho de tablas colocadas como si fuera una balsa, pero montadas en un eje de automóvil. Aunque era tirado por burros, el andar de un carretón era bastante suave gracias a que también tenía llantas de auto.

El miércoles 6 de marzo de 1940 Reynaldo Osorio Alanís conoció Itzoteno. Batallaba con unas hojas que el viento doblaba cuando intentaba escribir en ellas mientras se recargaba en sus rodillas. Era papelería oficial de la Secretaría de la Economía Nacional. En esas hojas membretadas y cuadrículas se podía leer también: Dirección General de Estadística. Hacía un mes que lo habían contratado para recopilar información para el Censo de 1940. Fue comisionado junto con otros compañeros para recorrer los pueblos y rancherías del municipio de Tepexyahualco, Puebla. Su jefe los fue repartiendo en un coche por la mañana en las diferentes localidades y acordó de recogerlos después, a las tres de la tarde. Reynaldo había llegado a la última casa de Itzoteno y luchaba contra el viento para anotar la cifra final. En Itzoteno había 561 personas: 293 eran hombres y 268 mujeres.

Reynaldo miró hacia un cerro cercano. Quiso saber cómo se llamaba y le preguntó a un niño que no había dejado de mirarlo desde que se detuvo para escribir la cifra final.

—Es el Cerro Pinto —dijo el niño—.

—¿Y tú cómo te llamas? —añadió Reynaldo—.

El niño miró hacia el cerro también y le dijo:

—Yo me llamo Licho.

Reynaldo lamentaba no haber llevado un cuaderno para recargarse al anotar, pero ya no importaba. Se recriminaba también no haber preguntado a qué hora lo iban a recoger. Pero tampoco servía de nada seguir pensando en ello. Lo único que no se podía quitar de la cabeza era que no pensó en llevar una chamarra más gruesa porque se estaba congelando. Se confió de que regularmente en marzo no hacía tanto frío, pero es que nunca había ido a Itzoteno. Poco después escuchó un claxon y volteó. Habían llegado por él.

Licho vio el vehículo alejarse en medio de una nube de polvo mientras pensaba dos cosas: un coche era algo que no llegaba a su pueblo todos los días, y que no había mucho que hacer para entretenerse ahí, en Itzoteno, una ranchería de calles arenosas. A seis kilómetros estaba la laguna de Alchichica. Alguna vez fue con su papá, pero no había sido tan divertido como suponía, lo sería ir con sus amigos. Licho iba a cumplir cinco años el 24 de mayo. Faltaba poco. Pensaba que sería bueno llegar a cinco porque tendría la edad suficiente para poder ir con sus amigos a la laguna.

Eliseo Ventura era su nombre, pero siempre le habían llamado Licho. Algunas de las cosas que anhelaba eran: ser lo bastante grande para poder manejar él sólo un carretón; tener una escopeta para ir de cacería al Cerro Pinto; e ir con otros muchachos a jugar a la laguna. Por eso elaboró un refinado plan cuando supo que el sábado irían varios de sus amigos con sus hermanos mayores, en bola fueron él y los demás

chiquillos, a pedir permiso para que lo dejaran ir a la laguna de Alchichica. Su papá dijo que sí y así fue como se cumplió uno de sus deseos.

Unos años después Licho pudo manejar un carretón; se hizo buen tirador, aunque siempre con escopetas prestadas y se aficionó a visitar la laguna de Alchichica.

Otra de las cosas que le gustaba hacer cuando era niño, era sentarse en uno de los costales de maíz que había en la tienda, y oír las historias que contaban los señores que ocupaban como cantina una de las dos únicas tiendas que había en Itzoteno. En realidad era la única opción, porque para las nueve de la noche la otra tienda del pueblo ya estaba cerrada. Aunque la tienda-cantina quedaba lejos de la casa de Licho tenía la suerte de que uno de esos señores que iban a beber cerveza y a contar historias, con frecuencia era algún familiar. Así que siempre llegaba a tiempo montado en los diablos de la bicicleta de uno de los participantes.

—Sí. Dicen que una sirena sale de la laguna.

—¿De Alchichica?

—De Alchichica. Sí ¿No ves que está conectada al mar? Por eso el agua está salada.

Licho había escuchado esa historia varias veces. Era una sirena de cabello plateado que se aparecía en la superficie del espejo de agua (Fig. 18.1). Su canto enamoraba a los hombres y los hacía ir enloquecidos tras ella, caminaban hacia la laguna incluso sin reaccionar cuando estaban dentro del agua. Ella se alejaba cada vez más y aquellos desgraciados que oían el canto,

terminaban por ahogarse en las aguas de la profunda laguna. Licho conocía bien la historia. Pero se moría de ganas por contarles lo que le pasó a él.

Era Semana Santa. Licho jugaba a orillas de la laguna de Alchichica con unos muchachos. Como era el más pequeño lo mandaron a comprar cigarros a una tiendita ubicada al borde del cráter. Para llegar tenía que rodear la laguna, así que en pocos minutos los gritos de sus amigos se perdieron y sólo se oían sus pasos enterrarse en la arena y el viento chocaba con su cara. Compró los cigarros y, al regresar, ya no soplaban tanto el aire por lo que pudo escuchar claramente los pasitos que lo seguían.

Al volverse vio a varios hombrecitos. Parecían niños, pero no podía ser porque Licho era un niño pequeño y ellos eran mucho más chiquitos que él. Iban desnudos y tenían panzas enormes. Pensó que sin duda eran duendes. Sintió miedo pero también curiosidad. Así que dejó que se le acercaran. Era de día y había mucho sol, por lo que pudo verles claramente las caras (Fig. 18.2).

Tenían rostros traviosos y le ofrecían un cono grande con helado. De repente dudó, y el miedo le ganó a la curiosidad. Sintió que respiraba más fuerte y pronto la nariz no le fue suficiente así que empezó a jalar aire por la boca. Dio media vuelta y escapó torpemente. Si alguien ha intentado correr en arena seca, sabrá que el cansancio es mucho y el avance poco. Licho lloraba y gritaba, pero estaba muy lejos como para que lo oyeran sus amigos o la señora de la tienda.

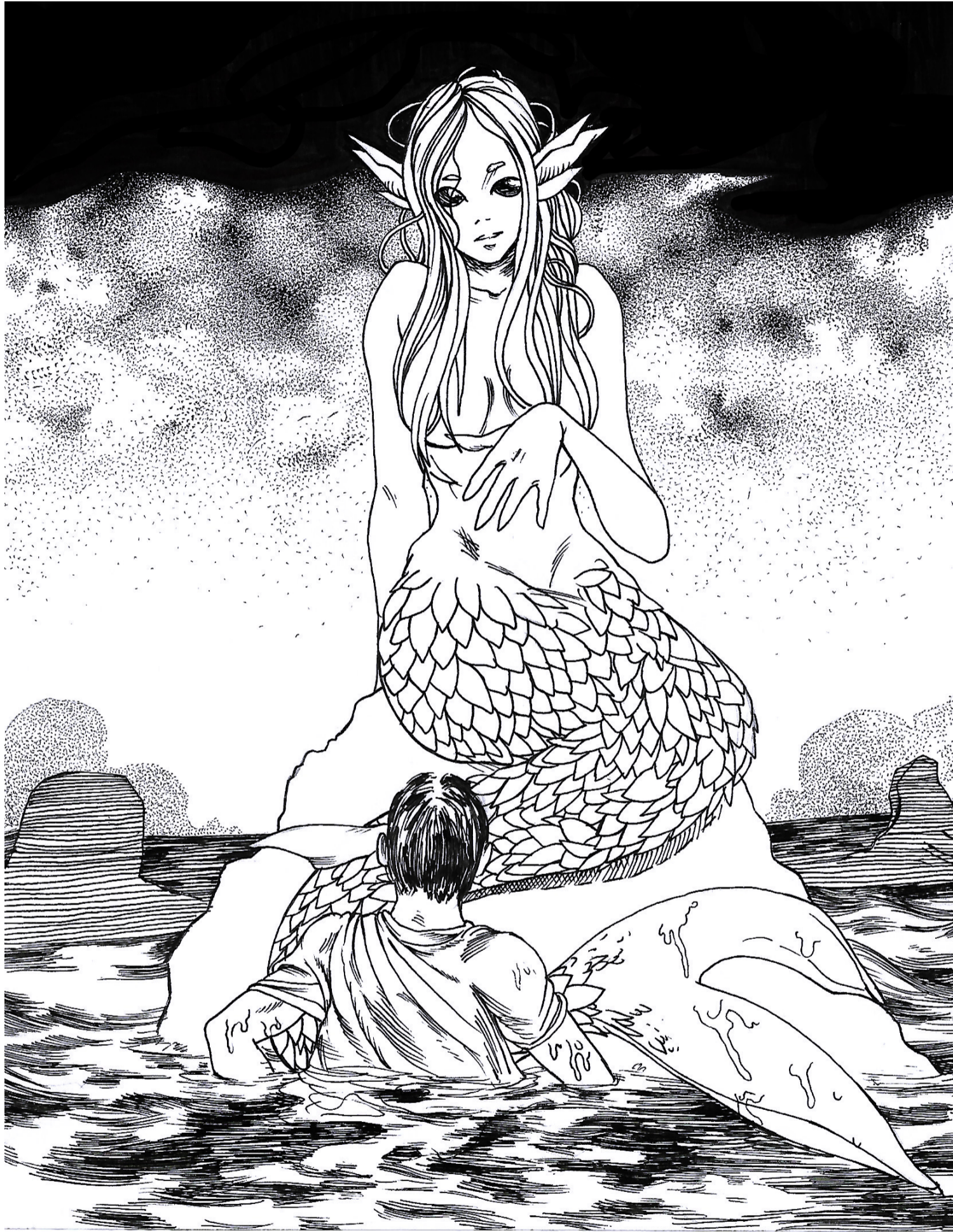


Figura 18.1. “La sirena de cabello plateado”. (Ilustración: Edgar M. Caro Borrero).

Los duendes lo persiguieron y le lanzaron piedras todo el camino hasta que logró dejarlos atrás o hasta que ellos decidieron dejarlo en paz. Al final llegó donde estaban sus amigos, pero no les dijo nada.

Aquella noche, mientras estaba sentado en el costal de maíz y miraba fijamente el foco débil que alumbraba la tienda, tampoco les contó nada a los señores que contaban historias y bebían cerveza.

Cuando cerraron la tienda, su pariente se fue caminando con los otros señores. Habían comprado tres cervezas para cada uno, y se las terminaron quién sabe en dónde. Licho tuvo que llevarse la bicicleta. Pensaba en lo mucho que le habría gustado que esos señores supieran de los duendes que vio. Eso pensó todo el camino a su casa y durante todos los años siguientes hasta hoy que ya tiene 84.

Conforme Licho fue creciendo se hicieron más frecuentes las oportunidades de contar lo que vio no sólo en la laguna, sino en su pueblo, Itzoteno, el cual después de todo resultó ser un lugar no tan aburrido. Por las mañanas antes de ir a la escuela tenía que ir a “raspar”. Se trata de uno de los procedimientos que deben hacerse para la elaboración del pulque. Consiste en desgastar con una cuchilla las paredes internas del corazón del maguey para obtener aguamiel, un líquido dulce que al fermentarse se transforma en pulque. Por la tarde llevaba a pastar a las chivas al campo. Ahí se encontraba con otros muchachos que también llevaban su rebaño. Era el lugar donde intercambiaba historias. Él contó lo que le

pasó con los duendes en la laguna y a cambio conoció qué eran “los encantos”.

El 23 de junio por la noche, mucha gente acude a la laguna. Quieren comprobar lo que dicen. Algunos afirman que, si se escucha con atención, se puede oír una música de gran belleza que proviene de la laguna de Alchichica y sus alrededores. Sin embargo, a la mayoría la mueve la ambición. Corre el rumor, de que esa noche precisamente, la del 23 de junio, aparece en el suelo un resplandor, un indicativo de que ahí, exactamente en ese punto, dentro de la tierra, hay enterrado dinero, quizá monedas de oro. Una vez hallada la luz, se debe esperar a la medianoche, porque es entonces cuando el suelo se abre. Se dice que en ese instante “se abre el encanto” y la gente “se ilusiona”.

Era famosa la historia de un hombre que literalmente fue tragado por su ambición. Aunque no se conoce su nombre, se sabe que era del pueblo de Techachalco.

La noche de un 23 de junio acudió a la laguna. Un poco incrédulo, se acomodó en un lugar alejado de las demás personas que acudieron esa noche. Pasado un rato, y tal como se lo dijeron, percibió que del suelo emanaba una luz. Paciente, aguardó a que fuera medianoche.

Llegado el plazo escuchó un ruido que supuso que era la tierra que se abría pero no pudo mirar nada. Estaba a punto de irse cuando se le ocurrió ver entre los matorrales y fue cuando descubrió una oquedad de donde salía un brillo apagado que apenas se distinguía en la oscuridad. Conoció entonces lo que era “tener una ilusión” y sin pensarlo

mucho, se adentró en las entrañas de la tierra. Dicen que el hombre encontró muchas riquezas, pero se entretuvo tanto tratando de llenar sus bolsillos que no vio que el encanto comenzaba a cerrarse. Quedó en la oscuridad absoluta, lleno de pánico y lamentando haberse dejado llevar por su ambición sin advertir que el pasadizo se cerraba. Transcurrió lo que calculó fue un día. De manera inesperada se abrió la entrada de nuevo. No quiso cometer el mismo error, por lo que tan pronto notó que se abría la tierra, salió de prisa y dejó adentro el tesoro que había encontrado. Era de noche, por lo que confirmó que debió pasar un día completo atrapado.

Ansiaba regresar a casa para contar la aventura que vivió. Imaginó que en su familia estarían muy preocupados por su ausencia. Al principio corría pero sintió que debía reducir la marcha porque de súbito tuvo mucha hambre y se sintió débil. Si no medía sus fuerzas quizá no alcanzaría a llegar antes de desmayarse. En el camino cortó algunas tunas. Las comió y se sentó a descansar un poco. Comenzó a dormir, pero el frío lo despertó. Mucho más repuesto reanudó la marcha. Llegó a su casa como a las tres de la mañana. Vio que alguien había encendido una fogata. Rodeó una cerca que delimitaba su patio, hecha de láminas oxidadas, palos, piedras amontonadas y arbustos. Llegó a la entrada y cuando desenganchó el alambre que sostenía la puerta de lámina, el rechinado despertó a un perro que comenzó a ladrar. El ladrido despertó a su vez a su familia. Su esposa salió. Pensó que su mujer

lo iba a regañar o a reclamar su ausencia, pero en vez de eso se echó a llorar. El hombre se sorprendió porque uno de sus hermanos y otros familiares que vivían en Veracruz salieron enseguida, pero se dio cuenta de que ellos estaban más sorprendidos de verlo a él, incluso uno que otro no pudo disimular un gesto de terror. Después de unos minutos le dijeron que se habían reunido para conmemorar su cabo de año, es decir, las ceremonias luctuosas que se montan en honor de una persona, para recordar un año de su fallecimiento. Comprendió que había sido dado por muerto y que no había pasado un día bajo la tierra como él pensó, sino todo un año.

En la laguna de Alchichica han pasado muchas cosas. Por ejemplo, en la ladera existe un panteón antiguo, pero nadie lo visita. Los difuntos que ahí descansan son quienes murieron de lepra. Cuando menos eso le contaron a Licho; él dice que de joven constató la existencia de esas tumbas, pero que hoy son difícilmente visibles. Ahora a sus 84 años ya no se aventura a buscarlas.

Otra de las cosas que se dicen, es que la laguna mantiene comunicación con otras lagunas cercanas: La Preciosa, Quechulac y Atexcac, y que cuando el nivel del agua aumenta o desciende en una se refleja de igual manera en las otras. Cuentan también que quienes se ahogan en las aguas de la laguna de Alchichica y cuyos cuerpos no son hallados con frecuencia aparecen en Altotonga, Veracruz; en un lugar llamado Pancho Poza, a 48 kilómetros de ahí.



Figura 18.2. “Los duendes”. (Ilustración: Edgar M. Caro Borrero).

Algunos dicen que en el fondo de la laguna se ubica un centro ceremonial de antiguas culturas prehispánicas. Otros afirman convencidos de que la laguna de Alchichica no tiene fondo; que alguna vez alguien mencionó que personal de la NASA quiso medir la profundidad, para lo cual usó una sondaleza (una cuerda de más de 120 metros de largo que sirve para medir el fondo marino), pero en Alchichica jamás llegaron a tocar el fondo (ver capítulo *El cuerpo de agua*).

Se asegura también que existe una caverna de donde salen y entran misteriosas esferas de luz multicolor resplandeciente; que hay una base extraterrestre establecida en el fondo del cráter, donde yace una nave nodriza; que un chamán le salvó la vida a una niña muy enferma, ayudado por extraterrestres; que alguien vio una vez un ovni y hasta escuchó un ensordecedor zumbido antes de que la nave se metiera en la laguna sin dejar rastro; o que de los ovnis descienden seres de largas cabelleras rojizas, ojos oblicuos verdes y brillantes.

Estas afirmaciones no solamente surgen de quienes viven cerca de la laguna. En internet un grupo de entusiastas de los ovnis aglutina información en lo que llaman *The Journal of Hispanic Ufology*, donde se puede encontrar un artículo fechado en Xalapa, Veracruz, el 12 de enero de 1998, el cual vincula a los ovnis con la laguna de Alchichica. Está escrito por un hombre llamado Arturo del Moral. Él relata que por esa fecha acampó con un grupo de colaboradores junto a la laguna de Alchichica. Los in-

tegrantes de su equipo notaron sucesos extraños como la inexplicable descarga de las baterías de su grabador de videocasette y las de su radio. Afirman también que las ondas de radio no podían penetrar en el área. Según su hipótesis se debe a un cono electromagnético similar al de la Zona del Silencio ubicada en Durango.

Del Moral dice haber entrevistado a una persona de nombre Roberto Sánchez, oriundo de la localidad de El Seco, quien le relató que dos años antes, en una noche de marzo de 1996, esperaba un autobús para regresar a su casa, luego de visitar a un amigo que vive a las orillas de la laguna de Alchichica. Pudo ver un intenso resplandor amarillo, desde donde estaba, que salía de las aguas (Fig. 18.3). Se acercó al despeñadero picado por la curiosidad cuando, de repente, “un objeto luminoso de tamaño considerable, de color blanco, emergió de la laguna, flotando por unos segundos, unos pocos metros sobre su superficie, antes de salir disparado”.

—Eso es lo que dicen, vaya Dios a saber cuál es la realidad —aclara Licho cuando cuenta cosas que no le pasaron a él o cosas que él no ha visto, como los ovnis—.

—Lo que sí me tocó —continúa—, lo que yo sí vi, fue cuando el pueblo se llenó de ajolotes. Era época de lluvias. Una tormenta inundó calles y casas en Itzoteno. Incluso el extenso llano que existe en las faldas del Cerro Pinto se convirtió en un océano temporal por el aguacero. Al respecto relata:

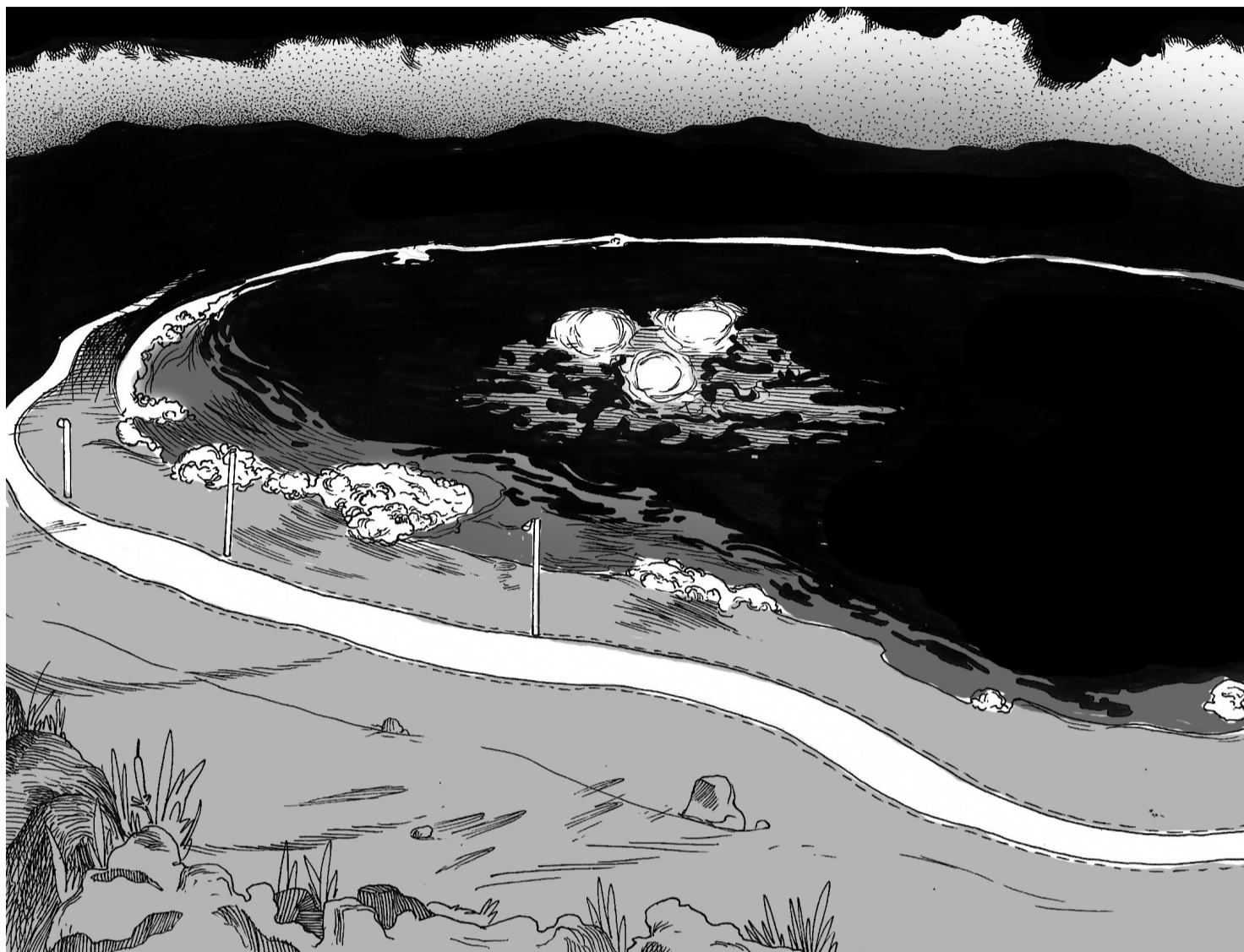


Figura 18.3. “El resplandor amarillo que salía de las aguas del lago”. (Ilustración: Edgar M. Caro Borrero).

“Era un 29 de septiembre, me acuerdo porque era la mera fiesta de San Miguel; y me acuerdo porque había harta gente y porque esos días ponen muchos puestos de comida. A mí me agarró el agua en el llano, andaba con las chivas. Ya cuando acabó de llover, junté a los animales y me fui para mi casa. Pero cuando pasé por un charquito, vi que algo se comenzaba a mover en el agua, así muy fuerte. Hasta me salpicó en un brazo. Nomás vi cómo salió un ajolotito, quería nadar, pero no podía porque se atoraba en la arena. (Fig. 18.4).

Yo pensé que el animalito se había quedado atrapado en el charco y que no le dio tiempo de esconderse porque le agarró el agua. Pero más adelantito había otros charcos, y había más ajolotes, pero en cantidad. Ese día iba con mi primo Moy y le dije: “Mira tú, acá también hay hartito ajolote”. Ya luego como que nos dio miedo a mí y a Moy. Él era más chiquillo que yo y me dijo mejor vámonos porque ya para entonces, en todo el llano comenzaron a moverse los ajolotes, y parecía como cuando sacan los pescados del mar y se mueven en la red. Así había en todo el llano y nomás se oía hartito ruido de que salpicaban.

No, pos mejor que nos vamos. Pero cuando llegamos al pueblo también había hartos ahí. Un señor nos dijo que no eran ajolotes, que según eran salamandras. Ahí ya habían agarrado algunas. Eran grandotas, de color negro con amarillo y estaban en todos lados: en el piso, en las paredes, en los techos. Algunas ya se habían subido a los cables y a los focos de las casas. Unos muchachos que vinieron una vez de México dijeron que a esa le nombran salamandra tigre. La gente que fue a vender por la fiesta pos ya nomás tuvo que resignarse. Los animales yo creo tenían hambre porque se subían a los puestos de comida. Primero las quitaban, pero eran hartas y ya mejor la gente las dejó porque negreaba de tanta que había en la comida y así ya no la iban a vender.

“Al principio uno trataba de no pisarlas, pero ya en la noche, casi no se veían y ya nomás uno sentía así blandito cuando uno las aplastaba, haga de cuenta que quedaba negro en el piso como si fuera plátano molido. Unos ya para esa hora andaban bien tomados y la mera verdá nadie se acordó de ellos porque la gente se fue temprano. Ya ni hubo misa de 8 porque ya no se podía estar en ningún lado por tanta salamandra. Varios que agarraron el trago se quedaron, y ahí durmieron. Yo me figuro que las salamandras les caminaban encima pero no les hicieron nada. Pero no nomás fue acá. Allá por Tetipanapa, en Pizarro y en Tepeyahualco, también se infestaron. Así estuvieron como tres años y de a poco se fueron desapareciendo. Ya nomás no las

vimos. A veces salían de la tierra cuando uno andaba con el arado. Las encontraba uno de repente. A unas sí las matábamos, pero es que no se veían. A lo mejor buscaban la humedá. Pero nomás fue esa vez porque ya luego, aunque llovía fuerte ya no salían. Quién sabe a qué se deba”.

En otra ocasión llovieron charales. Licho reconoce que muchos no le creen, al menos al principio:

“Luego a la gente que le platico no me cree —dice— pero yo lo vi. Me dicen: ¿Cómo van a llover charales? Es que por acá hay unos remolinos que luego se meten a la laguna de Alchichica o las otras que hay por acá y agarran agua, por eso le nombran la víbora de agua. Unos dicen, pero ¿cómo? si acá está bien seco, ¿cómo que víbora de agua? Pero no es un animal como la víbora de cascabel, sino que es un remolino que agarra agua en la laguna, se mira como un trozo de agua que va del suelo hasta la nube. Luego, si uno va por donde pasa, clarito se ve el camino que deja el remolino en la arena. Va por el camino, se mete en la hierba y si pasa por las casas luego se lleva los techos. Bueno. Pues una vez, por ahí en un pueblo que se llama La Gloria, hubo un remolino, pero fuerte. Comenzó primero allá por Las Minas, no sé si conozcan. La Preciosa también le dicen. De ahí de Alchichica son como diez minutos. Ahí el remolino chupó agua de la laguna esa, la que está en Las Minas, y se jaló hartito charalito y lo iba aventando por donde pasaba. Pobres animalitos nomás uno veía cómo se retorcían

porque quedaban en la arena o en el matarral. El charal de allá es más grandecito y huesudito que el de acá de Alchichica. Cuando uno se lo come y pasa por la garganta, se siente durito el esqueleto, pero el de acá, no. El de acá es chiquito y ni se siente. Parece como si fuera pura carne”.

María Martha Ignacia Hernández López (Fig. 18.5) también sabe distinguir de un vistazo cuál es charal de Alchichica y cuál no lo es. Conoce como nadie la laguna de Alchichica. Nació el 21 de julio de 1955 en Zalayeta, una localidad del municipio de Perote, Veracruz, ubicada a unos metros de la laguna. Tendría unos 28 años cuando, junto con su esposo Pedro Espinosa Lorenzo, decidió irse a vivir a la ladera del cráter. Tiempo después, quizás un par de años, su hermano Rubén se animó y se hizo su vecino. Después llegaron más y hoy ya se formó una pequeña colonia en la ladera. Ella afirma ser la primera que se fue a vivir a la laguna. Tiene cuatro hijos: Verónica, Alberto, María del Carmen y Norma Angélica.

La división territorial indica que la laguna de Alchichica está ubicada cien por ciento en territorio de Puebla, pero ella da su dirección así: José María Morelos número dos, Zalayeta, Perote, Veracruz. Por más de tres décadas doña Martha ha sido testigo de lo que le ha ocurrido a la laguna. Dice que hace años la gente bajaba a la laguna a lavar su ropa. Antes había un pozo de agua dulce, pero hace como 25 años que instalaron servicios de agua potable y drenaje; por eso ya casi nadie va a lavar o a

sacar agua dulce. Recuerda también que antes había más agua en la laguna. Hoy quizá se haya reducido el nivel por la falta de lluvia, pero también por la explotación de agua para regar sembradíos (ver capítulo, *El agua subterránea y el lago*). Antes no se veían esas rocas blancas que llaman “texcales” y hoy se aprecian claramente, señal de que la laguna se ha ido secando, sentencia la señora Hernández. Dice también que cada año, entre el primero y el cinco de mayo, la laguna “se enferma” (ver capítulo *La lama*): “se cubre de una nata verde, pero luego de unos días se le quita. Cuando hace viento, el agua se pone azul o verde y se ve clarita, pero cuando no sopla el viento, el agua se ve gris”.

Doña Martha cuenta que durante un tiempo corrió el rumor de que el zoológico *Africam Safari* había comprado la laguna, que ya no dejaban pasar a la gente y que por las noches iban a pescar ajolotes. Quizá se refiera a que en 2015 se inició un proyecto de conservación —que hoy es un programa— para preservar la especie conocida como ajolote de Alchichica o salamandra de Taylor, endémica (única) de ese cuerpo de agua (ver capítulo *El ajolote*).

“Por mucho tiempo la gente se sostuvo de la pesca —continúa doña Martha—, sacaban charales y los vendían en tamales o preparaban chilposito de pescado, un platillo popular en Veracruz que, además de charales, lleva nopales y epazote. Lo sirven muy caliente, porque vaya que se siente frío por estas tierras. Hoy ya es muy raro ver a alguien pescando, pero todavía



Figura 18.4. “La invasión de salamandras”. (Ilustración: Edgar M. Caro Borrero).

unas tres o cuatro personas se mantienen de esta actividad. Ya hay pocos charales y ahora algunos decidieron dedicarse mejor a ofrecer paseos en lancha a los turistas”.

En ocasiones, algunos visitantes desoyen las advertencias y se meten a nadar en esas aguas traicioneras. Un poco escéptica, doña Martha repite la conocida historia de que los ahogados en Alchichica, cuyos cuerpos no son localizados, salen allá por una poza de Altotonga, Veracruz, a casi 50 kilómetros de ahí. Su mamá le contó que una vez se volteó una lancha y los muertos aparecieron en Altotonga.

—Dicen que una vez echaron una paca de zacate y fue a salir por allá también, pero quién sabe —dice en medio de una risa incrédula.

Pese a los 35 años de ver todos los días la laguna, la señora Martha no tiene ninguna experiencia con ovnis como las que relatan los visitantes ocasionales. Reconoce que nunca ha visto luces ni ha oído nada raro, salvo lo que se cuenta y que el día del temblor no estaba cerca de la laguna, pero sugiere que le pregunten a su hija, Norma Angélica Espinosa Hernández. Ella también vive en la laguna y atestiguó la agitación que se experimentó en Alchichica el 19 de septiembre de 2017 con el sismo de 7.1 grados que registró la zona centro de México. A diferencia de su madre, Norma Angélica sí vio un ovni. Recuerda que días antes del temblor, percibió una luz roja grande que volaba despacio por encima de esa zona y desapareció súbitamente como una estrella fugaz. Del sismo dice

que el agua de la laguna se movía igual que como se muestra en un video de internet que circula, donde se ven los canales de Xochimilco, en los cuales las trajineras se bamboleaban por el inusitado oleaje que provocó el terremoto.

Los despachadores de la gasolinera de Alchichica suelen contar a los clientes que, de vez en vez, sale de la laguna un enorme ajolote a tomar el sol a la playa. Que ahí descansa y puede ser visto con su enorme cuerpo color café oscuro con manchas negras, igualito a los numerosos ajolotes que habitan en la laguna, pero en grandote. Dice doña Martha que, según los empleados de la estación de servicio, ese ajolote es muy tímido porque cuando la gente se acerca se asusta y se arroja rápidamente a la laguna. Alguien, incluso, pensó que si el famoso monstruo que supuestamente habita el lago Ness, en Escocia, era llamado “Nessi”, el ajolote grandote de Alchichica podría llevar el nombre de “Alchi”.

Y ya que están saliendo las historias, doña Martha rebusca en su memoria y finalmente se anima a contar lo que vivió hace algunos años. Antes no había luz. Se alumbraban con velas. Por eso no convenía andar al anochecer por ahí. Era mejor hacer todo cuando todavía daba luz el sol. Sin embargo, a veces era inevitable que la noche sorprendiera a alguien fuera de casa. Así le ocurrió una vez a doña Martha y a sus hermanos, cuando ella era una jovencita. Faltaba poco para llegar a casa cuando el atardecer dio paso a la cerrada oscuridad de la noche. Por fortuna, ella y sus



Figura 18.5. Sra. María Martha Ignacia Hernández López. (Fotografía: Mariana Vargas-Sánchez).

hermanos ya estaban cerca de casa y conocían el camino. De todas formas, había que cuidar dónde ponía uno el pie para no resbalar. Cuando llegaron al filo del cráter de la laguna de Alchichica, sabían que deberían ir bordearlo pues era el camino conocido, y el más corto, para llegar a su casa. Martha quitó un momento la vista del camino y volteó hacia la laguna. Pese a la oscuridad, podía distinguirse claramente cerca del agua, a una mujer con un camisón blanco y un velo cubriendo su rostro. Se detuvo y tocó el brazo de uno de sus hermanos. No fue necesario que señalara la laguna. Él también la estaba viendo. Quitaron la vista de esa aparición perturbadora y siguieron su camino hasta llegar a casa. Cuando vieron a esa mujer de ondulantes ropas blancas no oyeron nada. Pero lo sabían. Habían visto a La Llorona.

La historia de ese espectro femenino es bien conocido en todo México y nació a 230 kilómetros de Alchichica, en la Ciudad de México.

Aunque en países de habla hispana se le conoce también, tiene otros nombres y orígenes. La Llorona mexicana, con su característica vestimenta blanca, nació en relatos contados en calles de la ciudad capital. Uno de ellos indica que La Llorona sería la diosa Cihuacóatl, una recolectora de almas, considerada también la protectora de las mujeres fallecidas al dar a luz. Otras versiones señalan que es La Malinche, Marina, Malinalli, Malinali o Malintzin. Esa mujer cercana al conquistador español Hernán Cortés. La primera referencia de que La Ma-

linche es La Llorona y que se aparece en la Ciudad de México puede encontrarse en el libro *Las calles de México, Leyendas y sucesos*, de 1922, del cronista Luis González y Obregón. A 62 kilómetros de la laguna de Alchichica está la Zona Arqueológica de Cantona. Hay un museo de sitio que ayuda a explicar la dinámica que tenía esta ciudad prehispánica, sin embargo existe una colección paralela. Fue reunida por un hombre llamado Juventino Limón y por su familia. Muchos años antes de que el Instituto Nacional de Antropología e Historia (INAH) realizara excavaciones y tomara en resguardo los hallazgos, el señor Limón ya tenía una gran cantidad de objetos arqueológicos, algunos de los cuales se colocaron para su exhibición en un museo que había establecido dentro de su propia casa, clasificados de manera empírica y, al parecer, sin registros oficiales.

El INAH decidió no recuperar ese acervo, así que mucha información y secretos de ese lugar se perdieron, al menos parcialmente. Hay una historia que solía narrar el señor Limón: El nacimiento del primer mexicano, o el primer mestizo, hijo de La Malinche y de Hernán Cortés. Según el relato, camino a Tenochtitlán procedentes de Veracruz, Cortés y doña Marina pasaron por Alchichica. La Malinche iba con un embarazo avanzado. Cuenta que le atrajo el azul brillante del lago y se le antojó beber el agua de la laguna, que le resultó amarga (ahora sabemos que esta amargura es producto de las elevadas concentraciones de sulfatos y magnesio), lo que



Figura 18.6. Sr. Eliseo Ventura López, "Licho". (Fotografía: Elva Escobar).

habría desencadenado el parto. La persona de la que se habla, la del primer mestizo nacido supuestamente en Alchichica, sería Martín, el primer hijo que tuvieron Cortés y La Malinche.

El etnólogo Luis Barjau hizo una investigación durante diez años en torno a la figura de La Malinche. El libro *La conquista de La Malinche* es producto de ese trabajo. En la página 169 escribe:

...Marina tuvo dos hijos, un varón, Martín, con Hernán Cortés y una niña, María, con su esposo legítimo Juan Jaramillo. Martín es el primer mestizo de una vasta población que habría de habitar una nueva nación. (...) Martín Cortés, el hijo de La Malinche y del marqués nació en Coyoacán hacia finales de 1522 (tres años y algunos meses después del inicio de la relación de Marina con Cortés en Veracruz el 26 de julio de 1519) (...) Recibió el nombre de su abuelo paterno a la usanza española.

Considerando estos datos, es poco probable que Martín haya nacido cerca de la laguna de Alchichica.

Historias hay muchas. Quizá Martín no nació en Alchichica y es inverosímil que haya una base extraterrestre en el fondo de la laguna; o que uno pueda encontrar duendes o al ajolote gigante “Alchi” tomando el sol. Sin embargo, Licho y Martha sí existen. No se conocen entre ellos, pero sus miradas maravilladas se fijaron un día en la laguna. Licho quería dejar de ser niño para ir a jugar a ese singular cuerpo de agua. Hoy, con 84 años, ya no le dan ganas de jugar o

de escalar por la ladera. Pero cuenta lo que vio y lo que oyó. Lo que vivió. Martha se enamoró tanto de la laguna que quiso vivir para siempre junto a ella. Vivir de ella. Quien quiera conocerlos debe recorrer la carretera federal 140 y llegar a un punto cercano a la frontera de los estados de Puebla y Veracruz. Al llegar a la laguna, hay que bajar a las casas asentadas en la ladera y preguntar por doña María Martha Ignacia Hernández López. A Licho se le encontraba en Itzoteno. Hay que desviarse un poquito antes del kilómetro 76. Ahí está la salida hacia el pueblo. Si uno viene de la Ciudad de México, hay que tomar en cuenta que el acceso está del lado izquierdo, pero hay que tener cuidado al cruzar el sentido opuesto de la carretera, porque los coches vienen rápido. Se debe recorrer un camino de arena; buscar la calle 9 Poniente, ir a la última casa de la calle (y la última del pueblo). Eliseo Ventura se llamaba y era un hombre bueno. Un día, de niño, soñó ser grande. Y lo logró.

El Sr. Eliseo Ventura López falleció el 4 de julio de 2019 derivado de una neumonía. Este libro es para usted Don Licho, gracias por perpetuar sus enseñanzas en nuestros corazones (Fig. 18.6).

Agradecimientos

Damos las gracias a la Señora María Martha Ignacia Hernández López, a Norma Angélica Espinosa Hernández y a Eliseo Ventura López, por las entrevistas concedidas para la realización de este texto. A Moisés Arellano

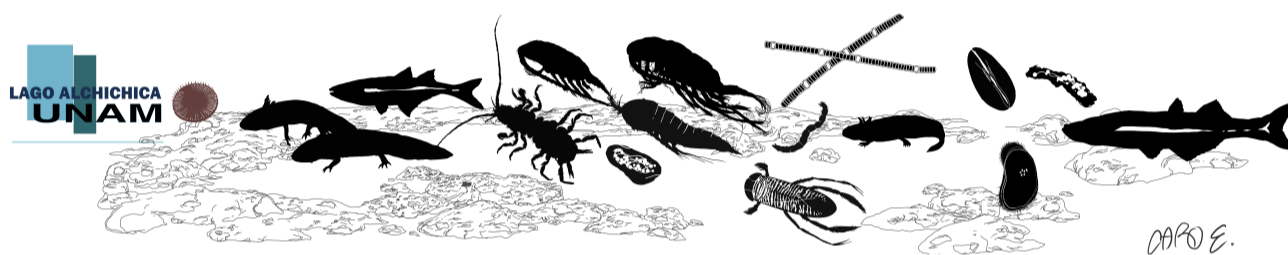
Peralta, Sixto Ventura Martínez y, en general, a la familia Ventura Martínez, por las hospitalidades brindadas durante la visita a Itzoteno y a la laguna de Alchichica. A la Dra. Gloria Vilaclara Fatjó y a la M. en C. Daniela Cortés Guzmán por llevar a cabo las entrevistas adicionales.

Contacto

Verónica A. Arellano Peralta. Consultora independiente sobre temas de medio ambiente.
veronica.medioambiente@gmail.com

Ángel Arellano Peralta. Productor del programa “Radio Centro Noticias” con Sergio Sarmiento en 97.7 FM.

Javier Alcocer. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Iztacala, Grupo de Investigación en Limnología Tropical. Av. de los Barrios No. 1, Los Reyes Iztacala, C.P. 54090 Tlalnepantla, Estado de México, México.



Lago Alchichica

UNA JOYA DE
BIODIVERSIDAD

