



INSTITUTO
DE ECOLOGÍA
UNAM

 **ikos=**

28

Junio 2024

Unidad Mérida del Instituto de Ecología: los inicios y su investigación



DIRECTORIO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Dr. Leonardo Lomelí Vanegas
Rector

Dra. Patricia Dolores Dávila Aranda
Secretaría General

Mto. Tomás Humberto Rubio Pérez
Secretario Administrativo

Dra. Diana Tamara Martínez Ruíz
Secretaria de Desarrollo Institucional

Lic. Joaquín Narro Lobo
Secretario de Atención a la Comunidad Universitaria

Mto. Hugo Concha Cantú
Abogado General

Dra. Soledad Funes Argüello
Coordinadora de la Investigación Científica

M. en C. Néstor Enrique Martínez Cristo
Director General de Comunicación Social

INSTITUTO DE ECOLOGÍA

Dra. Ana Elena Escalante Hernández
Directora

Dr. Julio E. Campo Alves
Secretario Académico

Mtra. María del Carmen Aguilar Mendoza
Secretaria Administrativa

Dr. Luis Enrique Eguiarte Fruns
Editor

Dra. Clementina Equihua Z.
Dra. Erika Aguirre Planter
Dra. Rosalinda Tapia López
Asistentes editoriales

Dra. Rosa Jimena Rey Loaiza
Corrección de estilo

Dr. Daniel Piñero Dalmau
Dr. Julio Campo Alves
Dr. Fernando Álvarez Noguera
Consejo editorial

Dra. Erika Aguirre Planter
Diseño editorial y formación

L. D. G. Abril Luz María Ángeles Trujillo
Diseño original

Oikos= año 9, No. 28 (junio 2024) es una publicación cuatrimestral, editada por la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, Ciudad de México, a través de la Unidad de Divulgación y Difusión del Instituto de Ecología, Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, C.P. 04510, México, Tel. (55)5622-9002, correo electrónico: oikos@iecologia.unam.mx, <https://www.ecologia.unam.mx/web2/index.php/es/comunicacion>. Editor responsable: Luis Enrique Eguiarte Fruns. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2017-111710202000-102, ISSN: en trámite, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Certificado de Licitud de Título y Contenido: en trámite, otorgado por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

El contenido de los artículos es responsabilidad de los autores y no refleja el punto de vista de los árbitros, del Editor o de la UNAM. Se autoriza la reproducción de los artículos (no así de las imágenes) con la condición de citar la fuente y se respeten los derechos de autor.

Distribuido por: Instituto de Ecología, Ciudad Universitaria, Circuito Exterior S/N, Delegación Coyoacán, C.P. 04510. Ejemplar gratuito.

Diseño de portada: Erika Aguirre P. y Rosalinda Tapia L. con fotografía de Mao Carrera del edificio de la Unidad Mérida en Yucatán, México.





INSTITUTO
DE ECOLOGÍA
UNAM

Junio 2024

CONTENIDO

EDITORIAL

Unidad Mérida del Instituto de Ecología: los inicios y su investigación	
Ana E. Escalante	5

ARTÍCULOS UNIDAD MÉRIDA

El nuevo edificio de las sedes foráneas de los Institutos de Ecología y de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas en el campus UNAM en Yucatán	
.....	7

Génesis de la sede foránea del Instituto de Ecología en el campus UNAM en Yucatán.	
Ana E. Escalante	8

Inauguración del edificio del Instituto de Ecología	
Luisa I. Falcón	9

Construyendo puentes para la restauración y manejo sustentable de las dunas costeras de la Península de Yucatán	
Gabriela Mendoza González, Pavel E. Popoca Cruz	11

Biodiversidad y microbioma en la península de Yucatán: primeros logros y muchos desafíos	
Ella Vázquez-Domínguez, Gabriela Borja-Martínez, Nastienka Pérez-Jiménez, Giovani Hernández-Canchola	14

La migración tiene sus ventajas, o lo que no te mata te hace más fuerte: reflexiones en torno a la inauguración del edificio sede del Instituto de Ecología- UNAM - Unidad Mérida	
Osiris Gaona	20

OTROS ARTÍCULOS

De parásitos, biodiversidad y transformación de la naturaleza en tiempos de pandemia

Ella Vázquez-Domínguez.....24

Las plantas en un mundo cambiante: estrés y genética

Mario Gutiérrez Rodríguez y Adriana Garay Arroyo.....28

El mundo oculto de los microorganismos marinos: el ciclo del nitrógeno en ambientes pobres en oxígeno y el cambio climático

Silvia Pajares Moreno.....33

El Marco de Kunming-Montreal para la conservación de la biodiversidad: más buenos deseos

Jorge Soberón.....37

Los misterios de un lugar legendario y mítico: los valles de Tehuacán y Cuicatlán

Luis E. Eguiarte y Clementina Equihua Zamora.....39

Editorial

Unidad Mérida del Instituto de Ecología: los inicios y su investigación

Ana E. Escalante
Directora
Instituto de Ecología

Este número especial de *Oikos=* celebra un hito en la historia del Instituto de Ecología: la inauguración del nuevo edificio de nuestra Unidad en Mérida, Yucatán. Este edificio concreta la creación y el equipamiento de un espacio físico que albergará y dará vida a nuevos proyectos académicos, recibirá estudiantes y permitirá seguir fortaleciendo la vinculación de la Universidad con la sociedad en sus distintas formas. En particular impulsará investigación en una región en donde hay grandes oportunidades de desarrollo científico.

El camino a esta Unidad no fue breve. Han existido desafíos de diversa índole, lo cual se ha tornado desesperante en momentos, pero también ha permitido madurar ideas y visiones, y construir colaboraciones. Felizmente, estos desafíos han sido superados gracias al trabajo y la colaboración de muchas personas, pero también gracias al decidido apoyo de autoridades y entidades universitarias. En primera instancia, la rectoría del Dr. Enrique Graue, con la visión de una universidad de la nación con presencia en todo el territorio y el apoyo para la consolidación del campus Yucatán de la UNAM. Enseguida, fueron críticos en su apoyo para llegar a esta inauguración el Dr. William Lee, Coordinador de la Investigación Científica, el Dr. Luis Álvarez Icaza Longoria, secretario administrativo, el Mtro. Xavier Palomas en la dirección general de obras y conservación, el Dr. Marco Antonio Domínguez, director general de personal, el Dr. Ken Oyama y la Dra. Patricia Dávila, secretarios de desarrollo institucional de nuestra universidad. También hay que reconocer a las direcciones previas de nuestro Instituto, los Dres. Constantino Macías y César Domínguez, y al Dr. Xavier Chiappa, director de la ENES Mérida, en donde se albergan estas instalaciones, y a la gran colaboración con el Dr. Ramsés Mena, director del IIMAS. Nuestro más sincero agradecimiento al albergue que nos fue proporcionado por el Parque Científico y Tecnológico del Estado de Yucatán, a través del uso de sus instalaciones y a la generosa colaboración de la Dra. Leticia Arena, Amanda Rodríguez y a todo el personal que nos brindó apoyo en todo momento.

También quiero aquí hacer mención del trabajo sostenido de las Dras. Luisa Falcón y Osiris Gaona, quienes desde 2017 desarrollan su trabajo académico en Yucatán y fueron las pioneras de la presencia del Instituto de Ecología en Mérida. Por supuesto también gracias a las invaluable conversaciones con el Secretario Académico del Instituto de Ecología por varios años, el Dr. Juan Fornoni Agnelli.

No quiero tampoco dejar de mencionar que gracias a varios proyectos de financiamiento las instalaciones del Instituto de Ecología cuentan con equipos de laboratorio y cómputo que permitirán el trabajo académico y de vinculación que son el centro de estos esfuerzos. En particular los financiamientos de CONACYT y de la DAAD (Agencia de Intercambio Alemán).

La historia del Instituto de Ecología en Mérida trasciende tres direcciones, la del Dr. César Domínguez, la del Dr. Constantino Macías y la actual, bajo mi encargo. Se inicia en el 2016-17, con la convocatoria de consolidación de laboratorios nacionales del CONACYT, con la visión de llevar el espíritu del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología a la Península de Yucatán, región especialmente vulnerable ante el explosivo desarrollo que experimenta y, que por lo tanto representa una oportunidad única para lograr incidir en cambios de trayectorias hacia un futuro sostenible. Desde el 2017, la presencia del Instituto de Ecología ha crecido paulatinamente, contando hoy con 7 plazas académicas tanto del LANCIS, como del departamento de Ecología de la Biodiversidad.

Los efectos progresivos del cambio climático asociados al desarrollo generan costos ambientales, sociales y económicos que no deben ser ignorados por ningún país. Las zonas costeras son particularmente susceptibles a los efectos negativos del cambio climático, incluidos el aumento del nivel del mar y el incremento de la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos y biológicos extremos, como enfermedades emergentes y de origen zoonótico, que elevan

la vulnerabilidad de los sistemas socio-ambientales. En México, tales eventos obligan a la península de Yucatán a actuar urgentemente para garantizar el desarrollo sostenible.

La meta de la creación de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología es consolidar un grupo de trabajo académico multidisciplinario que se integre con el resto de las entidades de la UNAM y de la región mediante colaboraciones para la investigación y la gestión ambiental sostenible. Este grupo, en principio, contará con capacidades en estudios en sostenibilidad, biodiversidad, así como ecología y evolución de enfermedades zoonóticas (y emergentes).

Las instalaciones del Instituto de Ecología en Mérida incluyen espacios de laboratorio para trabajo en microbiología y genómica, además de un anfiteatro para toma de decisiones, oficinas y cómputo de alto rendimiento. Estas instalaciones serán habitadas por personal académico consolidado y también joven y de reciente contratación. Esperamos contar con una planta académica de 10 personas en los próximos 3 años.

Mis mejores deseos para el grupo que representa hoy al Instituto de Ecología en Mérida, Luisa Falcón, Osiris Gao-
na, Gabriela Mendoza, Pável Popoca, Luis Osorio, Bertha Hernández y Malena Oliva.

¡Mucho éxito y felicidades!

Este número especial de *Oikos=* incluye seis colaboraciones de varios de estos y otros investigadores que participamos en la génesis de la Unidad Mérida, relatando nuestras experiencias en Mérida y la historia de esta Unidad. También incluye una reflexión de la Dra. Ella Vázquez-Domínguez, de nuestro Instituto, sobre los parásitos y la biodiversidad, una contribución para entender cómo funcionan molecularmente las plantas en un mundo cambiante de la Dra. Adriana Garay Arroyo, también de nuestro Instituto y de su alumno Mario Gutiérrez Rodríguez, y un artículo de nuestra querida colega del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM, la Dra. Silvia Pajares Moreno sobre los microorganismos marinos. Concluimos el número con unas ideas del Dr. Jorge Soberón, de la Universidad de Kansas, sobre el reciente convenio internacional sobre biodiversidad (Montreal, 2022) y un artículo que revisa un libro sobre un área muy rica en ese mismo tema, en biodiversidad (los valles de Tehuacán y Cuicatlán).



El nuevo edificio de las sedes foráneas de los institutos de Ecología y de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas en el campus UNAM en Yucatán

El 28 de julio del 2023 se inauguró este moderno edificio con la presencia de autoridades universitarias, invitados internacionales y miembros de la comunidad universitaria. Las autoridades universitarias incluyeron al Dr. William Lee Alardín, Coordinador de la Investigación Científica, al Dr. Luis Álvarez Icaza Longoria, Secretario Administrativo, y al Dr. Héctor Benítez Pérez, titular de la Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación (DGTIC). El Dr. Jan Felix Drexler, de la Charité-Universitätsmedizin, Institut für Virologie, Berlin, fue invitado internacional, y entre los miembros de nuestra comunidad universitaria se encontraban el Dr. Erik Molino Minerero, del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas (IMMAS), y la Dra. Luisa Isaura Falcón Álvarez, del Instituto de Ecología (IE).

En el evento se destacó la importancia de la nueva sede compartida, reconociendo la visión de la rectoría de la UNAM

encabezada por el Dr. Enrique Graue Wiechers, la colaboración con su administración central y distintas dependencias universitarias, así como el impulso original del proyecto desde las direcciones anteriores de ambos institutos. Asimismo, se hizo énfasis en la relevancia que tendrá la interacción académica entre el personal de esos institutos y con otras entidades dentro y fuera de la UNAM, así como el compromiso de las entidades en involucrarse en la atención de problemáticas locales. Se reconoció la dedicación de las y los académicos que han sido pioneros en estos proyectos con su trabajo en la región, resaltando cómo este espacio es una clara muestra de la consolidación y creciente presencia en la región de ambos institutos.

Este nuevo edificio y su infraestructura son reflejo del trabajo conjunto del IE y el IMMAS, y muestra el potencial para el desarrollo de proyectos académicos para beneficio de la región y de México.



Edificio de la Unidad Mérida, Yucatán del Instituto de Ecología de la UNAM
Fotografía: Mao Carrera

Génesis de la sede foránea del Instituto de Ecología en el campus UNAM en Yucatán

Ana E. Escalante

Los efectos progresivos del cambio climático asociados al desarrollo generan costos ambientales, sociales y económicos que no deben ser ignorados por ningún país. Las zonas costeras son particularmente susceptibles a los efectos negativos del cambio climático, incluidos el aumento del nivel del mar y el incremento de la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos y biológicos extremos, así como enfermedades emergentes y de origen zoonótico que elevan la vulnerabilidad de los sistemas socio-ambientales.

En México, tales eventos obligan a la península de Yucatán a actuar urgentemente para garantizar su desarrollo sostenible. La creación y el equipamiento del nuevo edificio de la sede foránea —la Unidad Mérida— del Instituto de Ecología (IE) en el campus UNAM en Yucatán representa un hito en la historia de nuestros Instituto. La meta de su creación es consolidar un grupo de trabajo académico multidisciplinario que se integre con el resto de las entidades de la UNAM y de la región, mediante colaboraciones para la investigación y la gestión ambiental sostenible. Este grupo inicialmente contará con capacidades en estudios en sostenibilidad, biodiversidad, así como ecología y evolución de enfermedades zoonóticas (y emergentes).

Las instalaciones del IE en Mérida incluyen espacios de laboratorio para trabajo en microbiología y genómica, además de un anfiteatro para toma de decisiones, oficinas y cómputo

de alto rendimiento. Estas instalaciones serán usadas por personal académico consolidado y también joven y de reciente contratación. Esperamos contar con una planta académica de 10 personas en los próximos 3 años. En este nuevo recinto dará vida a nuevos proyectos académicos, recibirá estudiantes y permitirá seguir fortaleciendo en distintas formas la vinculación de la Universidad con la sociedad.

El camino para consolidar la construcción de este nuevo edificio no ha sido sencillo. Han existido desafíos de diversa índole que se han tornado desesperantes en momentos, pero también han permitido madurar ideas y visiones y construir colaboraciones. Felizmente, estos desafíos han sido superados gracias al trabajo y la colaboración de muchas personas, pero también gracias al decidido apoyo de autoridades y entidades universitarias.

Así, desde el 2017, la presencia del Instituto de Ecología sede Mérida ha crecido paulatinamente contando hoy con siete plazas académicas pertenecientes tanto al LANCIS y como al departamento de Ecología de la Biodiversidad, incluyendo a las y los Drs. Luisa Falcón, Osiris Gaona, Gabriela Mendoza, Pável Popoca, Luis Osorio y recientemente en este año se incorporaron las Dras. Bertha Hernández Aguilar y Malena Oliva.



Laboratorio de la Unidad Mérida, Yucatán del Instituto de Ecología de la UNAM.

Fotografía: Mao Carrera

Ana E. Escalante es doctora en Ciencias e investigadora del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología de la UNAM. Es experta en ecología, genética y evolución microbiana. Así como en proyectos de sustentabilidad con énfasis en política pública para el manejo de ecosistemas. Actualmente es la Directora del mismo instituto.



Inauguración del edificio de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología

Luisa I. Falcón

El 28 de julio de 2023 se inauguró el edificio que alberga la Unidad Mérida del Instituto de Ecología y del Instituto de Investigaciones en Matemáticas Aplicadas y en Sistemas de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) en la ciudad de Mérida, Yucatán. Nuestro edificio está en el municipio de Ucú, al poniente de Mérida, y es parte del campus donde se encuentra ubicada la Escuela Nacional de Estudios Superiores (ENES).

Desde hace unos años la UNAM ha identificado la necesidad de tener presencia en Yucatán para comprender, afrontar y coadyuvar en la toma de decisiones basadas en el conocimiento, en una de las regiones del país con mayor diversidad natural y cultural pero que presenta problemáticas socioambientales complejas.

La península de Yucatán es una plataforma kárstica, formada por la disolución de rocas calizas de origen marino en donde se ha desarrollado un sistema hidrológico subterráneo complejo, que se estima contiene la tercera parte del agua dulce de México. En la península encontramos ecosistemas particularmente interesantes porque están conectados entre sí a escalas espaciales que oscilan de metros a kilómetros, y escalas temporales que van de semanas a cientos de años, mismos que han sido reconocidos entre los más productivos del planeta. Por ejemplo, en la franja costera de la península se asientan 54% de los manglares del país, responsables de más del 60% de la captura del “carbono azul”, es decir, de carbono fijado por fotosíntesis y exportado a los sedimentos en regiones costeras oceánicas. La continuidad del paisaje en la península depende de la salud de los ecosistemas, entre los cuales figuran también las dunas costeras, pastos marinos y selvas. Por otra parte, en la costa oriental de la península se presenta el segundo arrecife coralino de barrera más grande del mundo, y en Bacalar, Quintana Roo, el arrecife bacteriano formado por estromatolitos en sistemas de agua dulce más grande del planeta.

Pero en la península de Yucatán también se concentran varios de los polos de desarrollo urbano y de fomento agroindustrial, además de proyectos de infraestructura representativos del actual sexenio, que tienen un gran impacto ambiental. Por ejemplo, algunas estimaciones indican que en la actualidad se extrae 58% del volumen del acuífero, y además este recibe actualmente la infiltración de aguas residuales provenientes de fosas sépticas ineficientes y del escaso uso de plantas de tratamiento. Considerando lo anterior, la península de Yucatán en el futuro va a sufrir un retroceso significativo en la línea de costa, cambio asociado al aumento en el nivel



Asistentes a la inauguración del nuevo edificio del Instituto de Ecología de la UNAM en la Unidad Mérida, Yucatán.
Fotografía: Mao Carrera

medio del mar por el efecto del cambio climático global, y junto con la sobreexplotación del acuífero, se prevén problemas de intrusión de agua marina, lo que modificará el entorno natural y por ende contribuirá a la crisis socioambiental de la región.

El cambio de uso de suelo en la península ha disminuido la extensión territorial de las selvas, que han sido transformadas en pastizales en la zona ganadera y por terrenos para agricultura, principalmente. En el estado de Yucatán más del 80% de la vegetación natural ha sido perturbada. Estos paisajes fragmentados son el escenario ideal para que se desarrolle una serie de vectores de enfermedades zoonóticas, que en la península se asocian principalmente a artrópodos (mosquitos, chinches, garrapatas). Así, ya estamos viviendo en 2023 e inicio del 2024 una de las peores epidemias de dengue.

El proyecto institucional de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología (IE), UNAM, se remonta a varios años antes, cuando diversas académicas y académicos participamos en una convocatoria del entonces CONACYT, cuyo objetivo fue consolidar la colaboración entre la UNAM, (que ya contaba con otras dependencias en el mismo campus), la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) y otras entidades de la península de Yucatán a través de la creación de un nodo del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS), actualmente un departamento del IE en Ciudad Universitaria. Posteriormente, las direcciones encabezadas por el Dr. Constantino Macías y la Dra. Ana Escalante, propusieron que el nodo-LANCIS

creciera a una Unidad Regional del Instituto de Ecología, abarcando diferentes especialidades, todas necesarias para comenzar a enfrentar las problemáticas de la península.

Nuestras propuestas fueron apoyadas. Con el fin de desarrollar el proyecto, me mudé a Yucatán a inicios de 2018. El resto del equipo del Laboratorio de Ecología Bacteriana, que yo coordino, fue llegando en los meses siguientes. La sede temporal se ubicó en el Parque Científico y Tecnológico, en donde la UNAM tiene un edificio de investigación. Ahí, los colegas de diferentes entidades del Campus Yucatán, en particular los doctores Xavier Chiappa-Carrara y Leticia Arena, nos abrieron las puertas, permitiendo que tuvieramos espacio para recibir equipo y ponernos a trabajar. Para marzo de 2018, aunque sin edificio propio, ya estábamos instalados: con capacidad de hacer investigación, procesando muestras, dando clases, haciendo labores de divulgación y vinculación, siempre cobijados por el Campus Yucatán. Nuestro eficiente arranque se dio en parte gracias a que llevábamos más de una década trabajando ecosistemas peninsulares y ya teníamos un entretrejido de colaboraciones y proyectos con diferentes colegas del Campus Yucatán y otras entidades académicas de la región.

Actualmente el Campus en Yucatán de la UNAM cuenta con once entidades académicas, incluyendo la Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida (ENES Mérida), en la cual se ofrecen siete licenciaturas (<http://www.enesmerida.unam.mx/#/index>), entre ellas la licenciatura en Ecología (<http://www.enesmerida.unam.mx/#/lmszc/16>). Somos sede de diferentes posgrados y estamos involucrados en múltiples iniciativas de vinculación y divulgación.

Una gran cualidad que ha ido surgiendo en el Campus Yucatán de la UNAM es que no existen barreras entre las entidades porque se comparten espacios. Por ejemplo, la Sala de Toma de Decisiones que nuestro proyecto inicial CONACYT-nodo LANCIS instaló en el Parque Científico y Tecnológico ha sido, desde que se construyó, también usada para reuniones de trabajo y las clases de varios posgrados.

La ceremonia de inauguración del edificio del IIMAS e IE, Unidad Mérida contó con la participación de los directores, jefes de departamento y académicos, además de autoridades y colegas de diferentes entidades del campus. Después de la ceremonia tuvimos un encuentro académico en el cual investigadoras e investigadores de ambas entidades, presentamos los proyectos que nos trajeron a la península de Yucatán.

Formar parte del equipo que impulsó la creación de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología ha sido una experiencia inmensamente satisfactoria. El edificio cuenta con diferentes espacios que incluyen dos laboratorios, oficinas y una Sala de Toma de Decisiones. Nuestra ubicación es ideal para interactuar con los estudiantes y colegas de las diferentes licenciaturas de la ENES de manera cotidiana, enriqueciendo aún más nuestra vida académica.

Las condiciones de infraestructura recién inauguradas extienden la capacidad de IE para planear actividades de investigación, impartición de cursos de posgrado y talleres, hacer trabajo de campo en Mérida y la región. Cualquier actividad de colaboración futura indudablemente potenciará los logros de nuestro instituto no solo a escala nacional sino internacional.

Luisa Falcon es bióloga por la Facultad de Ciencias de la UNAM, maestra en ciencias por la UNAM y por la Université d'Aix Marseille II, y doctora en ciencias por la Universidad de Stony Brook. Es investigadora titular "C" del Instituto de Ecología, Pride nivel "D" y SNI III. Ha impartido clases desde 2004. Fundó el Laboratorio de Ecología Bacteriana, ahora parte de la Unidad Mérida. Sus líneas de investigación incluyen la ecología microbiana en ambientes acuáticos, ecología del microbioma de fauna silvestre y ecología microbiana de ambientes polares. Bajo su dirección se han concluido tres tesis de licenciatura, seis de maestría y ocho de doctorado.

Construyendo puentes para la restauración y manejo sustentable de las dunas costeras de la Península de Yucatán

Gabriela Mendoza González y Pavel E. Popoca Cruz

No es un secreto que la península de Yucatán es una de las regiones de México más vulnerables al cambio climático y al incremento del nivel del mar. La península se distingue por su paisaje topográfico de baja elevación, con ecosistemas que se encuentran inmersos en un sorprendente y único entrelazamiento biológico y físico conectado principalmente por flujos de agua subterránea, que desemboca en el mar. En sus costas se encuentran pequeños lomeríos de arena que no alcanzan más de cinco metros sobre el nivel del mar y que son conocidos como dunas costeras. Estas son muy dinámicas, debido a que la arena se mueve por las corrientes de agua desde el piso marino, a las barras de arena sumergidas y por el viento en la playa y en la misma duna.

A pesar de ser bajas, las dunas costeras en la península de Yucatán representan un medio de protección y adaptación al cambio climático y al incremento del nivel del mar, debido a que la elevación de su relieve casi siempre está cubierto de vegetación y en conjunto, actúan como barreras rompevientos que reducen el impacto de las mareas, oleaje y vientos fuertes hacia el interior de la Península.

Las dunas costeras han sido reconocidas mundialmente por proveer una gran cantidad de *contribuciones ecosistémicas* también llamadas *servicios ambientales* o *ecosistémicos* —por

beneficiar a las sociedades humanas—. Entre las contribuciones más apreciadas se encuentran la regulación climática y la belleza escénica del paisaje, todas gracias a su funcionamiento y diversidad natural. También son ecosistemas arenosos sumamente frágiles y vulnerables ante la acción humana, por lo que frecuentemente se encuentran degradados por la falta de conocimiento y sensibilidad ante la importancia de sus contribuciones al bienestar humano.

En México, las dunas costeras han sido poco valoradas, ya que generalmente son perturbadas y transformadas para construir casas de playa y hoteles. También es muy común observar en estos ambientes, estructuras ingenieriles de concreto y cemento que afectan el gran dinamismo de las dunas rompiendo la dinámica y movimiento natural de la arena que conforma a estos ecosistemas y que, al final, representa una costosa batalla perdida por los graves problemas que surgen al eliminarlas. Estas problemáticas se repiten frecuentemente en las costas del Caribe y del norte de la Península de Yucatán.

Afortunadamente, en la Península de Yucatán poco a poco sus habitantes y las autoridades empiezan a reconocer que los desarrollos costeros sin la protección natural de las dunas costeras están más expuestos a los embates meteorológicos provenientes del mar. Recientemente y de manera gradual, las intervenciones ingenieriles



Las “Amigas del Manglar y la Duna” en la duna de Sisal, Yucatán, en una foto tomada por ellas mismas con un dron.

han ido cambiando, y ahora es posible encontrar algunas alternativas verdes que son más suaves y armoniosas con el ambiente y por lo tanto, duraderas.

Estas nuevas estrategias son un ejemplo de lo que se conoce como “Soluciones basadas en la Naturaleza” <https://iucn.org/es/nuestro-trabajo/soluciones-basadas-en-la-naturaleza>, en las que se reconoce una relación clara y positiva entre la biodiversidad y el bienestar humano. A través de ellas se intenta imitar o parecerse un poco más a los ecosistemas naturales que han sido perturbados y/o transformados, para adaptarse y resolver problemas, por ejemplo los que surgen por el cambio climático. Para lograr este tipo de proyectos sustentables y armoniosos ha sido necesaria la interacción de distintos sectores sociales, políticos y disciplinas académicas. El desarrollo de alianzas entre sociedad, academia y gobierno son primordiales para el éxito de proyectos de esta clase porque se requiere de la capacitación y concientización de la sociedad para promover su involucramiento en la toma de decisiones mediante procesos participativos y de gobernanza que permitan el mantenimiento sostenible de los proyectos.

El Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) de la UNAM recientemente arribado a Mérida, Yucatán como parte de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología, unam, tiene el objetivo de construir puentes de interacción entre la academia y tomadoras y tomadores de decisiones de la región, contemplando a la sociedad civil, empresarios y gobierno. A través de la investigación inter y transdisciplinaria, buscamos impulsar y participar en alianzas entre diferentes sectores de la población para la conservación y manejo sustentable de los sistemas naturales. Lo anterior en un contexto socio-ecológico en el que se reconoce que las acciones humanas tienen una repercusión en la biodiversidad y recíprocamente la biodiversidad impacta el bienestar humano.

En el LANCIS-Mérida, actualmente y de manera paralela, estamos desarrollando varios proyectos de restauración y manejo de las dunas costeras con un enfoque transdisciplinario. Estos se encuentran implementados tanto por organizaciones de base comunitaria —conformadas principalmente por mujeres y sus familias—, como por empresarios —como Mayakoba—, entidades de gobierno —incluyendo a la Zofemat (Zona Federal Marítimo Terrestre), Ayuntamientos, Secretarías ambientales, Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP)— y organizaciones de la sociedad civil: —como por ejemplo The Nature Conservancy-México (TNC), World Wildlife Fund (WWF) o Fondo Mundial para la Naturaleza, Pronatura-Yucatán, Sustentur— y de cooperación internacional —como GIZ Sociedad Alemana de Cooperación Internacional y PNUD Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo—. La intención de estos proyectos colaborativos es que la sociedad, desde distintos ámbitos, se involucre en la conservación y restauración ecológica de playas y dunas costeras degradadas y así recuperar sus funciones y contribuciones ecosistémicas mediante la adaptación de soluciones basadas en la naturaleza.

Para llegar a este punto, el parteaguas para plantear los proyectos de investigación aplicada fue generar información básica que permitiera primero adquirir el conocimiento de la dinámica bioló-

gica y física de estos ecosistemas. Previo a la creación de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología, UNAM se desarrollaron proyectos de investigación de ciencia básica en la Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación de la Facultad de Ciencias de la UNAM en Yucatán. Con estos proyectos fue posible conocer la biodiversidad vegetal de las dunas costeras y la provisión de sus servicios ecosistémicos. Estos proyectos ocurrieron en colaboración con el Centro Mexicano para la Innovación de Energía del Océano, el Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, en sus sedes CU y Sisal con financiamiento del entonces CONACYT y de la SENER. Una vez que aprendimos sobre la dinámica litoral, comenzamos a vincularnos en proyectos para aplicar este conocimiento en la toma de decisiones, esto implicó trabajo transdisciplinario con diferentes comunidades locales.

Consideramos que el nacimiento reciente de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología de la UNAM va a permitir de manera muy natural trabajar en el campo de las Ciencias de la Sostenibilidad, dándole continuidad a todo nuestro trabajo previo. Gracias a esto, nuestro equipo se ha diversificado y fortalecido a través de nuevas interacciones entre las diferentes especialidades de la ENES-Mérida (por ejemplo con los Laboratorios de Cómputo y Geomática y de Biología Celular y Molecular), el LANCIS del Instituto de Ecología en Ciudad Universitaria y la llegada de especialistas a la Unidad Mérida del Instituto de Ecología.

Las metas a mediano y largo plazo son continuar trabajando en el camino de las Ciencias de la Sostenibilidad para distintos ambientes, y contribuir de manera sustantiva en la atención de problemáticas locales y regionales en la Península de Yucatán y paralelamente en la consolidación de la presencia de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología.



Integrantes del LANCIS-Mérida, LANCIS-CU y de la OSC “Centinelas del Agua” realizan una campaña de muestreo de calidad del agua en el Área Natural Protegida Xcabel-Xcabelito, municipio de Tulum, Quintana Roo. Fotografía tomada por ellas mismas

Gabriela Mendoza González es Bióloga y Doctora en Ciencias. Es investigadora del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad, del Instituto de Ecología de la UNAM, Unidad Mérida, Yucatán. A través del trabajo multi, inter y transdisciplinario, su investigación se enfoca en el conocimiento de los factores antrópicos, climáticos y ambientales que vulneran la zona costera y a sus habitantes. También en la aplicación de Soluciones basadas en Naturaleza a través del análisis de la relación entre la biodiversidad y el bienestar humano bajo un enfoque dinámico de sistemas complejos.

Pavel E. Popoca Cruz es Ingeniero Ambiental y especialista y Maestro en Geomática por el Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial (CentroGeo). Es técnico Académico en el Laboratorio de Ciencias de la Sostenibilidad del Instituto de Ecología de la UNAM, en la sede Mérida. Su experiencia abarca la gestión de información espacial, la geovisualización y el desarrollo de procesos participativos para el estudio de sistemas socio-ecológicos, la Gestión Basada en Ecosistemas (EBM, por su siglas en inglés) y la construcción de la sostenibilidad. También cuenta con experiencia en temas de estructura urbana y justicia espacial, como el efecto de isla de calor urbana, la evaluación de la accesibilidad alimentaria y la cobertura de equipamiento urbano.

Para saber más

- CONAFOR. Dunas costeras: [http://5090 Dunas costeras, ecosistema prioritario para el país_ CONAFOR.pdf](http://5090.Dunas%20costeras,%20ecosistema%20prioritario%20para%20el%20pa%C3%ADs_CONAFOR.pdf)
- CEMIE. Océano: <http://cemieoceano.mx>
- Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo PNUD <http://undp.org>
- GIZ. <https://www.giz.de/de/html/index.html>
- Pronatura <https://www.pronatura-ppy.org.mx/>
- Seminario permanente del proyecto PAPIIT: "Determinantes de la erosión costera". Sesión 13 (youtube.com)
- Lanresc, Laboratorio Nacional de Resiliencia Costera <https://www.lanresc.mx/>

Biodiversidad y microbioma en la península de Yucatán: primeros logros y muchos desafíos

**Ella Vázquez-Domínguez, Gabriela Borja-Martínez,
Nastienka Pérez-Jiménez y Giovani Hernández-Canchola**

En los últimos 70 años hemos visto una acelerada y dramática pérdida de biodiversidad a escala mundial. Esa pérdida ha sido más notable en las zonas tropicales y del Sur Global. Son múltiples las causas de la disminución en la biodiversidad, pero entre ellas destacan las que conllevan una transformación del hábitat para dar paso a las actividades humanas, en particular la deforestación, la agricultura, la ganadería y la urbanización.

De manera paralela a la pérdida de la biodiversidad, se han incrementado los brotes de enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes, específicamente las que son transmitidas por animales. Estas enfermedades son conocidas como *enfermedades zoonóticas*, definidas técnicamente como cualquier enfermedad infecciosa que se transmite de los animales no humanos al ser humano y viceversa.

Por un lado, la pérdida de biodiversidad y la transformación de la naturaleza pueden provocar un cambio en las dinámicas de los ecosistemas, es decir, en las relaciones entre todos los componentes del ecosistema (la flora y la fauna, los factores abióticos como el suelo y los nutrientes, etc.), al alterar las relaciones entre organismos potencialmente patógenos y sus hospederos. Por otro lado, al alterar el entorno se difumina la frontera entre las zonas más o menos conservadas y las habitadas por los seres humanos, lo que facilita e incrementa el contacto directo entre la gente, sus mascotas y los animales de granja con la fauna silvestre y sus patógenos asociados. Las especies silvestres o domésticas que utilizan recursos de zonas antrópicas son conocidas como *animales sinantrópicos*. Además, la sobreexplotación de recursos naturales, la caza y el tráfico ilegal de fauna silvestre también aumentan el riesgo potencial de las zoonosis.

Todos los animales, plantas y hongos multicelulares dependen de microorganismos para sobrevivir. A dichos microorganismos asociados los llamamos *microbioma*, que son virus, bacterias, arqueas y hongos microscópicos. Los organismos que conforman el microbioma viven y proliferan en la piel, el sistema respiratorio, reproductivo y digestivo de los animales y los seres humanos, así como en otras partes de su cuerpo. Como un ejemplo de su utilidad, el microbioma ayuda a digerir los alimentos que de otra manera los animales no podrían asimilar y contribuyen a mantener su sistema inmunitario sano. El microbioma en las plantas habita en las raíces, tallos y hojas y facilita la obtención de nutrientes como el nitrógeno; además, ayuda a la protección contra depredadores y

parásitos, y puede facilitar su supervivencia en ambientes desérticos o muy húmedos.

El microbioma en general representa una relación mutualista, esto quiere decir que los microorganismos también se benefician, ya que sus hospederos les proveen recursos y un ambiente adecuado para completar su ciclo de vida. Al conjunto del organismo hospedero y su microbioma se le conoce como *holobioma*. El trabajo de científicas y científicos ha permitido conocer que el microbioma varía en relación con diversos aspectos del hospedero, incluyendo sus características genéticas, dieta, sexo, etapa de desarrollo, conducta y respuesta inmunitaria. El microbioma a su vez regula funciones fisiológicas del hospedero, como la eficiencia alimentaria, el balance de nutrientes, el crecimiento, la resistencia a desarrollo de enfermedades, entre otras.

El *paisaje*, en el sentido ecológico de la palabra, es otro factor clave en la dinámica de la relación hospedero-microbioma. Las variables climáticas (como la temperatura y la humedad), las ambientales (como la altitud sobre el nivel del mar, la topografía y la vegetación, así como la presencia de ríos y montañas) y las antropogénicas (incluyendo carreteras, zonas agrícolas, infraestructura urbana), al igual que la configuración en la *matriz* del paisaje (o sea, si se distribuyen los ambientes en parches, bordes, corredores, etc.), afectan la composición, la transmisión y la incidencia de las comunidades microbianas.

La modificación del paisaje y la transformación antropogénica de los ecosistemas han modificado a las poblaciones de animales silvestres y a sus comunidades microbianas asociadas alterando las relaciones biogeográficas (de los seres vivos con su ambiente) y evolutivas (entre los seres vivos a lo largo de su historia evolutiva) que hospedero y huéspedes han establecido durante millones de años. Al desbalance en las comunidades del holobioma se le conoce como *disbiosis*. Dentro de la disbiosis se reconocen varios procesos no excluyentes, entre ellos la pérdida de diversidad de microorganismos del microbioma, la pérdida de microorganismos benéficos específicos y el incremento de organismos patógenos.

Con base en todo lo anterior, es necesario conocer con claridad los efectos de la perturbación del ambiente en la interacción humano-animal para determinar los procesos de disbiosis y el potencial origen de enfermedades emergentes y reemergentes. Sin duda, este es uno de los grandes retos de investigación de nuestro siglo.



La Unidad Mérida del Instituto de Ecología y el proyecto del holobioma en la península de Yucatán

En 2015 inició el proyecto de desarrollar un nodo del Laboratorio Nacional de Ciencias de la Sostenibilidad (LANCIS) del Instituto de Ecología de la UNAM en la península de Yucatán, que visionariamente más tarde creció para ser una unidad académica: la Unidad Mérida del Instituto de Ecología. Su sede natural fue la ciudad de Mérida, donde ya existía una fuerte presencia de centros de investigación estatales y de nuestra universidad. Tomó varios años y tres responsables de la dirección del Instituto —los doctores César Domínguez, Constantino Macías y Ana Escalante— y que finalmente el 28 de julio de 2023 se inauguró oficialmente el edificio que alberga nuestra sede foránea.

La meta de esta unidad es:

...consolidar un grupo de trabajo académico multidisciplinario que se integre con el resto de las entidades de la UNAM y de la región, mediante colaboraciones para la investigación y la gestión ambiental sostenible para la reducción de la vulnerabilidad regional ante escenarios de cambio climático.

Son varios los objetivos de esta unidad, entre los cuales aquí resaltamos el de realizar investigación en áreas de ecología, evolución urbana, genómica, epidemiología y enfermedades emergentes.

En ese contexto, desde el año 2020, las doctoras Ella Vázquez Domínguez y Luisa Falcón Álvarez, del Instituto de Ecología, y el Dr. Gerardo Suzán Azpiri, de la Facultad de Medicina Veteri-

naria y Zootecnia, de la UNAM, propusimos un proyecto multi e interdisciplinario en la península de Yucatán. Nuestro equipo conjunta una amplia experiencia en ecología molecular (estudio de la relación entre los organismos y el ambiente con base en la teoría y las herramientas de la genética y la genómica), ecología animal y microbiana (estudio de los microorganismos en el ambiente y sus interacciones) y epidemiología de fauna silvestre (estudio de las enfermedades zoonóticas). La combinación de estas disciplinas nos permite abordar el estudio de las enfermedades zoonóticas desde un enfoque único y novedoso. Afortunadamente obtuvimos un significativo financiamiento del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIT) de la UNAM.

Así, en 2021, y todavía bajo las diversas restricciones resultado de la pandemia de covid-19, iniciamos el proyecto “Monitoreo y diagnóstico integral de la diversidad del holobioma (microbioma y viroma), con énfasis en SARS-CoV-2, en la interfaz humano-animal en la península de Yucatán”, con un numeroso equipo de investigadores colaboradores (de dependencias de la UNAM e instituciones del estado de Yucatán), estudiantes de licenciatura, posgrado y becarios posdoctorales.

El objetivo principal de nuestro proyecto es recopilar e integrar información genética de hospederos (sobre todo de especies de murciélagos y roedores silvestres), la diversidad del microbioma asociado y las características del paisaje, para entender cómo evoluciona el hospedero y su microbioma (holobioma) en relación con el paisaje donde se distribuye. Para ello, primero caracterizamos el paisaje describiendo los factores que lo componen, por ejemplo,

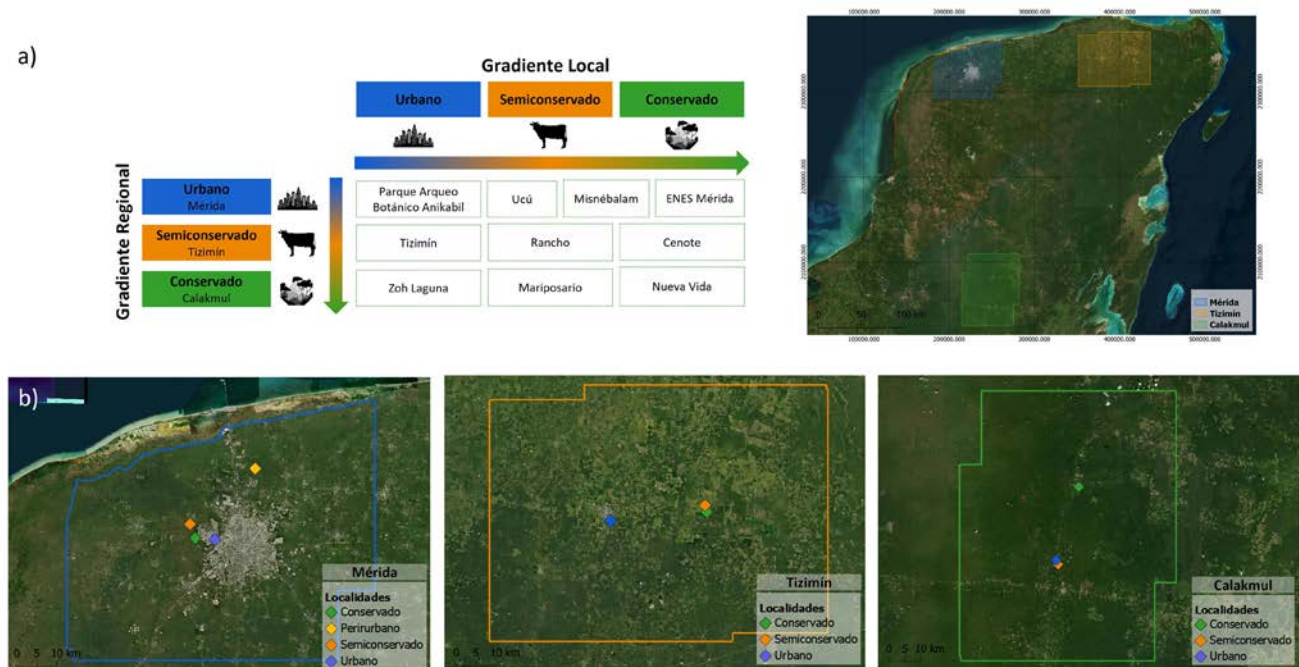


Figura 1. a) Diseño de muestreo en la península de Yucatán, donde se detallan el gradiente de conservación regional (Mérida, Tizimin, Calakmul) y sus correspondientes gradientes locales (localidades de muestreo del estudio). El Parque Arqueológico Botánico 'Anikabil' (en Mérida) y Nueva Vida (en Calakmul) son los extremos de urbanización- conservación de nuestro gradiente regional. b) Mapa con la ubicación geográfica de las regiones (izquierda) y localidades de estudio (derecha). Imagen de las autoras.

el tipo de vegetación, el uso de suelo, ciertas variables climáticas y antrópicas, entre otros. Para obtener la información sobre el microbioma de los animales silvestres y sinantrópicos utilizamos herramientas moleculares y secuenciación genómica; con base en ello estimamos la riqueza, composición y diversidad filogenética del microbioma. También evaluamos los niveles de diversidad y diferenciación genética de los hospederos (las especies de ratones y de murciélagos) con datos genómicos. Finalmente, determinamos cuál es la relación entre el paisaje, la genética poblacional del hospedero y los patrones de diversidad de su microbioma a lo largo del gradiente de más urbanizado a más conservado en la península de Yucatán.

Primeros resultados del proyecto

Durante estos tres años hemos realizado diferentes actividades de campo, laboratorio, gabinete (procesamiento de imágenes satelitales para evaluar el paisaje), bioinformáticas (análisis de datos genómicos) y divulgación. Aquí queremos compartir algunos de los resultados más sorprendentes que tenemos hasta ahora sobre la caracterización del paisaje en el área de estudio, sobre qué sucede ecológicamente con los murciélagos y roedores que viven ahí, y las características más relevantes del microbioma bacteriano (el bacterioma) del intestino en los roedores.

Para nuestro estudio (véase figura 1) nos preguntamos si cambian las características del microbioma en un gradiente regional, desde Mérida (ambiente urbano) a Tizimín (semiconservado) y, por último, a Calakmul (conservado). También queremos saber qué pasa dentro de cada región en un gradiente local que también cubre localidades urbanas, semiconservadas y conservadas.

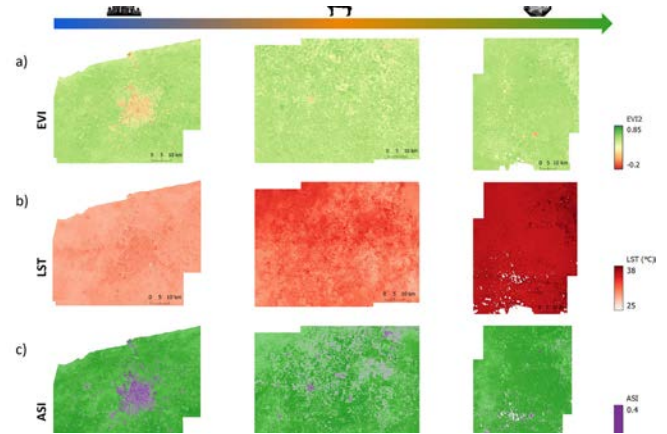


Figura 2. Mapas que ilustran algunos de los índices calculados para nuestro estudio. Cada columna representa una región del gradiente (de izquierda a derecha, Mérida, Tizimín, Calakmul). Índices: a) EVI (vegetación), b) LST (temperatura superficial), c) ASI (superficies alteradas). Se aprecia, por ejemplo, que Mérida tiene menor cobertura de vegetación y mayor área urbanizada en comparación con las otras dos regiones. Imgen de las autoras.

Lo primero que hicimos fue describir las superficies del paisaje de cada uno de los sitios de estudio. Para ello utilizamos imágenes satelitales del Sentinel-2A de la Agencia Espacial Europea (ESA). Las imágenes del Sentinel-2A están formadas por 13 bandas espectrales que operan desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta, y que muestran un barrido de la superficie terrestre y costera de la Tierra. Con base en estas detalladas imágenes, así como en datos del INEGI y datos ambientales que tomamos en campo, estimamos 24 diferentes índices de vegetación, ambientales y de perturbación antrópica que son útiles para responder las pregun-

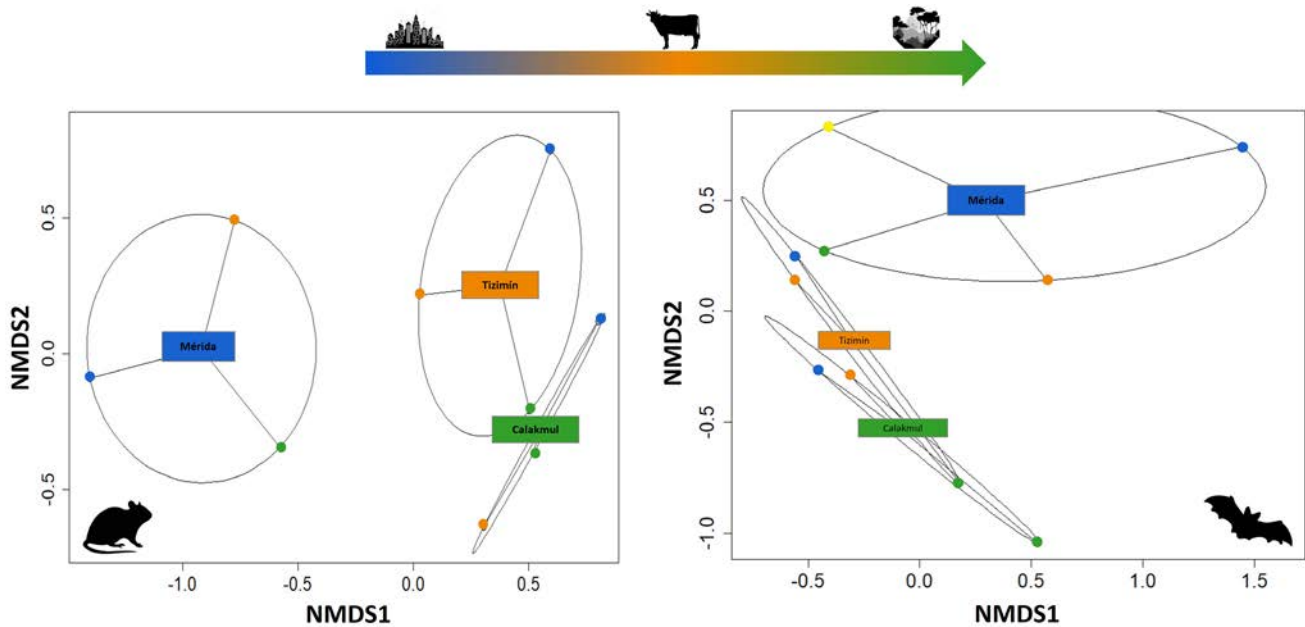


Figura 3. Resultados de un análisis multivariado (NMDS) que se basa en las especies presentes (su abundancia) en cada sitio y el grado de conservación de los sitios en el gradiente regional y local. La información contenida en los polígonos de líneas negras muestra qué tanto se parecen o no las comunidades de roedores (izquierda) y murciélagos (derecha). Imagen de las autoras.

tas que nos planteamos. Con esos índices generamos mapas a una resolución de 10 m de todos los sitios de estudio, por ejemplo, el índice de vegetación mejorado (EVI en inglés) con el que vemos la cantidad de vegetación (cobertura) que hay en los sitios, el índice de superficies artificiales (ASI en inglés), con el que determinamos la extensión de área modificada, o el índice de temperatura superficial (LST en inglés). Como se aprecia en la figura 2, estos mapas muestran las diferencias en el paisaje que hay dentro y entre regiones. Por ejemplo, en el extremo izquierdo de la imagen se puede distinguir la región más urbanizada, que es la ciudad de Mérida y que es la que tiene menos vegetación. Cuando comparamos estos mismos valores con los otros dos sitios de estudio de nuestro gradiente vemos que en Tizimín, la región semiconservada, el valor promedio del EVI se parece más al de Calakmul, la región más conservada y con una mayor cobertura vegetal; sin embargo, los valores de ASI de Tizimín son mayores porque una amplia extensión de superficie ha sido modificada para fines agrícolas y ganaderos. La temperatura superficial es mayor en Mérida, que es el sitio con más área modificada y menos vegetación (véase figura 2).

Diversidad faunística y su microbioma en el gradiente de conservación

Encontramos patrones de distribución faunística muy interesantes, ya que las comunidades de animales cambian entre regiones y localidades según el gradiente de conservación. Es decir, observamos que de Calakmul a Tizimín y Mérida, las especies de ratones y murciélagos son diferentes, como lo ilustran los polígonos que están más alejados en la figura 3. Las localidades más conservadas de Tizimín y Calakmul tienen mayor diversidad de especies, con presencia de roedores (por ejemplo, *Ototylomys phyllotis*) y murciélagos (*Dermanura phaeotis* y *Carollia sowelli*) que encontramos sólo en estos sitios. En comparación, en Mérida —la región más modificada— la diversidad es menor y las especies más abundantes además

están presentes en las tres regiones: un ratón (*Peromyscus yucatanicus*) y dos murciélagos (*Artibeus jamaicensis* y *Glossophaga mutica*).

También estudiamos la diversidad funcional de las especies, incluyendo el gremio trófico que las agrupa de acuerdo con sus características ecológicas, por ejemplo, de lo que comen (frugívoras si se alimentan de frutas, granívoras de semillas) o de uso de hábitat, que refleja cómo usan el espacio (arborícolas si viven en los árboles o terrestres si a nivel del suelo). Los resultados que encontramos muestran que la diversidad funcional es mayor para los roedores en Calakmul y para los murciélagos en Tizimín. Dicho de otra forma, desde la perspectiva de los mamíferos silvestres, las zonas altamente modificadas son menos diversas tanto taxonómica (número de especies) como funcionalmente (número de grupos funcionales diferentes). Además, en términos de las variables del paisaje que evaluamos, vemos que la mayor diversidad taxonómica y funcional se asocia con los sitios que tienen mayor cobertura de vegetación, y que dicha diversidad disminuye mientras más nos acercamos a los asentamientos humanos.

Desde la perspectiva del microbioma, también observamos patrones muy reveladores de riqueza, abundancia y diversidad que concuerdan con la diversidad taxonómica y funcional descrita antes. En particular para los roedores, encontramos que las especies que tienen un bacterioma intestinal más diverso son las que están presentes en las zonas conservadas (como *Sigmodon toleticus*) (figura 4a). Asimismo, el conjunto de los bacteriomas (es decir, el bacterioma de todas las especies presentes en un sitio) en la localidad urbana de Mérida (la más modificada) es el menos diverso y más diferente de todos (figuras 4b y 5). En contraste, la mayor diversidad está en las localidades más conservadas (Tizimín y Calakmul).

En la ecología de las enfermedades el objetivo primordial es estudiar y conocer las bacterias con potencial patogénico, tanto para los animales silvestres y domésticos como para el ser humano. Con base en nuestros resultados podemos destacar el orden de las

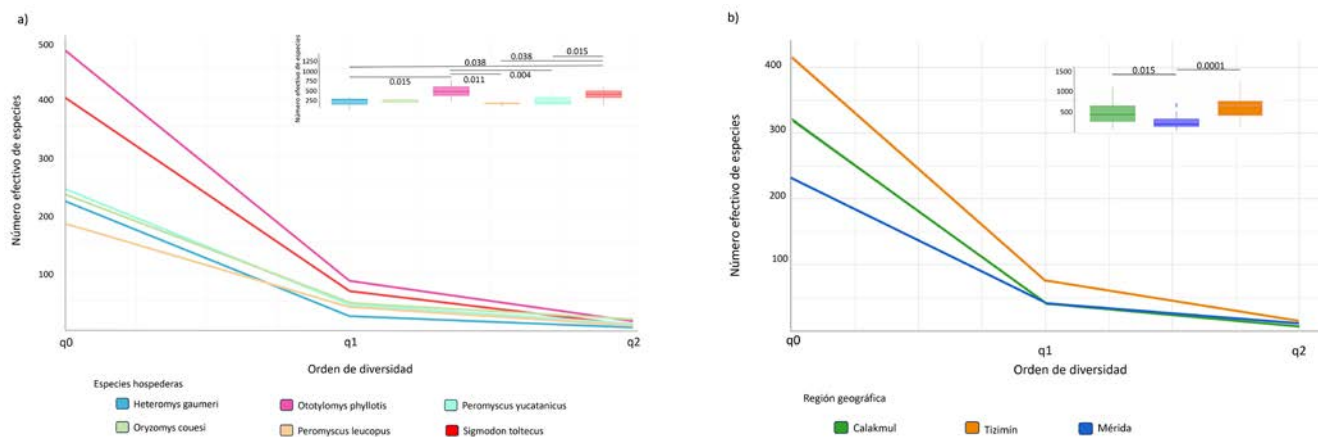


Figura 4. Diversidad del microbioma bacteriano (bacterioma) del intestino de los roedores (a) entre las especies estudiadas y (b) entre regiones. Los valores del eje de las 'x' representan la riqueza de especies bajo diferentes métricas que se refieren al número total de especies (q0), de especies más comunes (q1) y de especies más abundantes (q2). Como ejemplo, en a) *Ototylomys phyllotis* es el roedor con mayores valores de diversidad. En los gráficos de bigotes (parte superior de cada gráfico) se indican las comparaciones que son estadísticamente diferentes, como se aprecia en b), donde Mérida es diferente comparada con Tizimín y con Calakmul. Imagen de las autoras

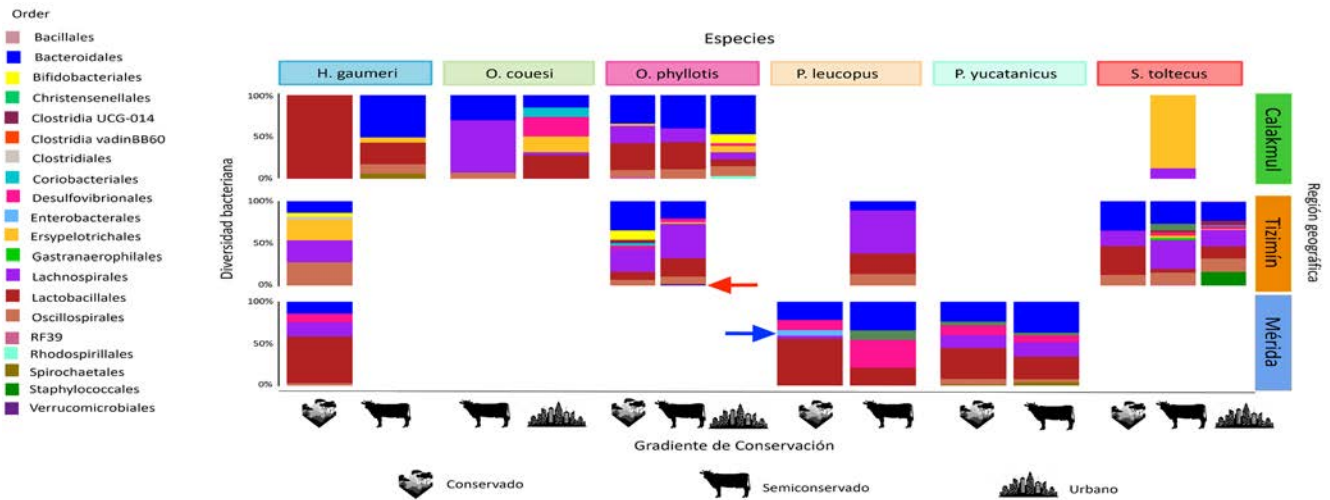


Figura 5. Diagrama que muestra la diversidad a nivel de orden de microorganismos (lista en la parte izquierda) del microbioma intestinal en las especies de roedores estudiadas por región (Calakmul, Tizimín, Mérida) y gradiente de conservación dentro de cada región (conservado, semiconservado, urbano). El total de órdenes diferentes es menor en Mérida. Se indican con flecha roja el orden de las Enterobacteriales presente en el ratón *Peromyscus leucopus* de la región de Mérida, y el orden de las Verrucomicrobiales con flecha azul en *Sigmodon toltecus* de Tizimín. Imagen de las autoras.

Enterobacteriales, presente en el ratón *Peromyscus yucatanicus* de la región de Mérida (la más urbanizada), como se muestra con una flecha azul en la figura 5. La presencia de las enterobacterias se ha relacionado con disbiosis en el ratón común, *Mus musculus*, especie directamente asociada con los asentamientos humanos. Asimismo, detectamos bacterias de las familias Clamydiae (orden Verrucomicrobiales, señalada con flecha azul en la figura 5) y Yersiniaceae (Enterobacteriales); de ambas familias existen algunas especies patógenas. También encontramos presencia de los géneros *Helicobacter* y *Campilobacter* en el roedor *Sigmodon toltecus* de la región Tizimín, bacterias que podrían asociarse a enfermedades del sistema digestivo (por ejemplo, *Helicobacter pylori* en humanos).

Nuestros resultados también muestran patrones particulares de recambio, es decir, la medida que indica cuánto cambian las comunidades microbianas entre hospederos en una región y entre regiones. Estos análisis se hacen comparando pares de especies, y lo que observamos para el caso de los roedores es que los bacteriomas son diferentes entre las especies que las hospedan, pero también son distintos entre las regiones Mérida, Tizimín y Calakmul. Estos resultados confirman que Calakmul, la región más conservada y con mayor diversidad, es muy distinta de las otras regiones; ahí, *Oryzomys phyllotis* (recordemos que encontramos este ratón en las zonas conservadas) tiene la mayor diversidad de bacterioma entre las especies presentes. A su vez, vemos que Mérida se diferencia por su menor diversidad asociada casi exclusivamente al bacterioma de *Peromyscus yucatanicus* (figura 6). Podemos confirmar que la alta diversidad microbiana que identificamos en Calakmul está asociada con la alta conectividad del paisaje que tiene esta región.

Conclusiones y perspectivas

En conjunto, los primeros resultados de nuestro proyecto del holobiotoma en la península de Yucatán contribuyen a documentar que sí hay un efecto del gradiente de antropización sobre la diver-

sidad taxonómica y funcional de los hospederos, así como en la riqueza, abundancia y diversidad de su microbioma. En otras palabras, mientras más conservado es el hábitat, mayor diversidad de microorganismos en el microbioma de los roedores y murciélagos estudiados.

Nuestro proyecto continúa y nos quedan muchas cosas por estudiar. Primero concluiremos los análisis del microbioma para los murciélagos y del viroma para ambos grupos de animales. Podemos adelantar que los primeros resultados indican que la mayoría de las especies silvestres presentan varias familias de coronavirus, pero ninguna hasta ahora de las variantes asociadas al SARS-CoV-2. Asimismo, estamos analizando en detalle cómo se relaciona la diversidad y diferenciación genética de los hospederos con su microbioma y las variables más antrópicas del paisaje.

Como lo mencionamos al inicio, la pérdida de la biodiversidad ha ocasionado un incremento a nivel mundial de las zoonosis —los brotes de enfermedades infecciosas emergentes y reemergentes— y, por ende, de las enfermedades zoonóticas. Queremos que nuestra investigación y los resultados presentes y a futuro justifiquen, desde una perspectiva más aplicada en términos de conservación del ambiente y la biodiversidad, así como de la salud animal y humana, la relevancia de mantener sitios con la menor modificación posible. Una manera de hacerlo es regulando el cambio de uso de suelo y las actividades humanas, y fomentando que, además, se mantengan corredores que unan las zonas urbanas y/o rurales con las más conservadas de la matriz que las rodea. Con ello deseamos estimular la presencia de comunidades faunísticas diversas y de sus microbiomas asociados, manteniendo sus interacciones y la dinámica del ecosistema. Pues no hay duda de que dichas prácticas promoverán la conservación de los ecosistemas y de la biodiversidad, para lograr una relación saludable entre los ambientes poco modificados y los habitados por el humano.

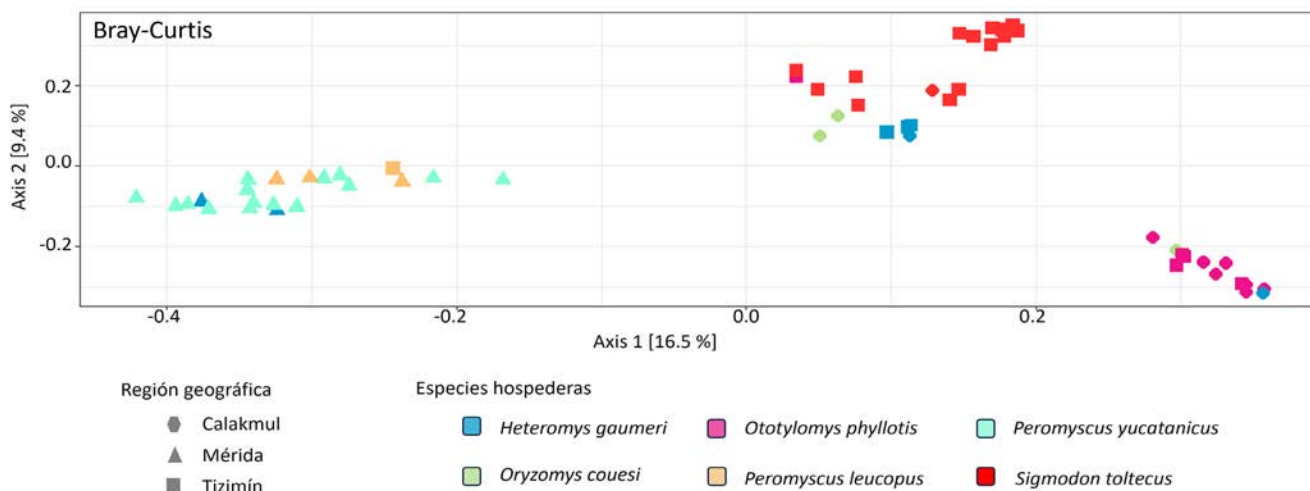


Figura 6. Gráfica que muestra las diferentes comunidades bacterianas (recambio) del microbioma intestinal de las especies de roedores estudiadas (que se indican con diferente color), en las regiones Mérida (triángulos), Tizimín (cuadrados) y Calakmul (hexágonos). Se ve que el microbioma de los ratones hospederos es diferente por región y entre regiones. Imagen de las autoras.

Agradecimientos

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT-UNAM), por el proyecto número IV200421 (EVD), a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA-UNAM) por la beca posdoctoral a GHC, y al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT) por las becas de posgrado a GABM (887756) y NPJ (1085893).

Ella Vázquez-Domínguez obtuvo el título de bióloga de la Facultad de Ciencias de la UNAM y realizó su doctorado en el Centro de Ecología (hoy Instituto, IE) de la UNAM. Actualmente, es Investigadora titular C del Departamento de Ecología y Biodiversidad del mismo IE. Sus líneas de investigación incluyen principalmente la ecología molecular y urbana, genética y genómica de poblaciones y del paisaje, evolución y conservación de fauna (evazquez@ecologia.unam.mx).

Gabriela Borja-Martínez es bióloga egresada de la Facultad de Ciencias de la UNAM, realizó sus estudios de maestría y actualmente los de doctorado en el IE. Sus intereses se enfocan a la ecología y evolución de pequeños mamíferos asociada a perturbaciones antrópicas (gborja@ieecologia.unam.mx).

Nastienka Pérez-Jiménez es bióloga de la Facultad de Ciencias de la UNAM y actualmente está realizando una Maestría en Ciencias Biológicas en el IE de la misma universidad. Sus intereses están enfocados hacia la ecología y conservación de comunidades de mamíferos y cómo las afectan las variables ambientales, del paisaje y antrópicas. (nastienka@ieecologia.unam.mx).

Giovani Hernández-Canchola es biólogo por la Facultad de Ciencias y doctor en ciencias egresado del Posgrado en Ciencias Biológicas, ambas entidades de la UNAM. Realizó una estancia posdoctoral en Louisiana State University, y actualmente es investigador postdoctoral en el IE. Sus principales intereses son el estudio de los procesos micro y macroevolutivos de mamíferos pequeños (giovani@ciencias.unam.mx).

Para saber más

- Gibb, R., D.W. Redding, K.Q. Chin, et al. (2020). Zoonotic host diversity increases in human-dominated ecosystems. *Nature*, 584: 398-402. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2562-8>
- Hauffé H., y C. Brelli (2019). Conserve the germs: the gut microbiota and adaptative potential. *Conservation genetics* 20: 19-27. <https://doi.org/10.1007/s10592-019-01150-y>
- Mimura, M., T. Yakahara, D.P. Faith, E. Vázquez-Domínguez, et al. (2017). Understanding and monitoring the consequences of human impacts on intraspecific variation. *Evolutionary Applications*, 10: 121-139. doi: [10.1111/eva.12436](https://doi.org/10.1111/eva.12436)
- Morand, S. (2020). Emerging diseases, livestock expansion and biodiversity loss are positively related at global scale. *Biological Conservation*, 248: 108707. doi: [10.1016/j.biocon.2020.108707](https://doi.org/10.1016/j.biocon.2020.108707)

La migración tiene sus ventajas, o lo que no te mata te hace más fuerte: reflexiones en torno a la inauguración del edificio sede de la Unidad Mérida del Instituto de Ecología

Osiris Gaona

Desprenderse de las facetas que conforman a un ser humano es, sin duda alguna, un trabajo que pareciera imposible. Para el mundo laboral somos un número de trabajador. El mío es 139,345. Para las y los colegas de nuestras entidades, somos investigadoras o tenemos el puesto de técnicas académicas, o somos posdoctorantes, estudiantes, servicios sociales, personal de confianza, personal de base. Cada persona que trabaja en la Universidad es una pieza importante y esencial para que esta institución centenaria pueda continuar con la enorme labor de dar educación a un gran país como el nuestro.

Como mujer y académica, me fue muy difícil dejar el lugar seguro que representaba Ciudad Universitaria, el cual había sido mi segundo hogar por más de veinte años, para trasladarme a la península de Yucatán. No hubiera sido posible sin el entusiasmo de una gran mujer y científica, la Dra. Luisa Falcón, quien me enseñó el camino maravilloso hacia un mundo diminuto. Las circunstancias nos hicieron coincidir y pudimos, entre las dos, conciliar dos mundos biológicos: el macro y el micro, y hemos desarrollado una línea de investigación pionera en México.

Estudiamos la microbiota de la vida silvestre, lo que consiste en entender a los millones de microorganismos (bacterias, virus, arqueas, etc.) que viven en el cuerpo de cada individuo animal o vegetal. En particular, nos interesa conocer los microbiomas que, de acuerdo con Laurice Flowers y Elizabeth A. Grice, representan el conjunto de genomas que interactúan en la microbiota. El microbioma es actualmente considerado un “órgano” esencial, ubicuo y simbiótico por la función que desempeña, no solo para los seres humanos, sino para todos los animales y plantas que habitan el planeta. Una parte significativa de este “órgano” se encuentra en el intestino, en donde la asociación está generalmente enriquecida con especies de arqueas, bacterias, virus y eucariontes.

Andrés Moya y Manuel Ferrer concluyeron en 2016 que la mayoría de estos microbios del sistema digestivo de los animales son simbiontes mutualistas que promueven la salud de sus hospederos al facilitar la asimilación de nutrientes, resistir colonizaciones de bacterias antagónicas a la salud (es decir, que pueden provocar enfermedades), colonizar el sistema inmunitario y estimular una amplia variedad de funciones.

Por otro lado, no es un secreto para nadie que me conozca que mi pasión son los murciélagos. Esta pasión es también herencia de un gran investigador de nuestro Instituto de Ecología, conocido popularmente como “el Batman de México”, el Dr. Rodrigo

Medellín. De tal suerte que las enseñanzas de los dos únicos jefes directos que he tenido me llevaron por el camino para estudiar la microbiota de animales de vida silvestre, con énfasis en los murciélagos, que han sido mi sujeto de estudio desde hace ya casi veinticinco años.

Estudiar murciélagos y sus microbiomas

Muchas noches salgo con mis guantes de carnaza y mis redes de niebla para atrapar a los murciélagos y recopilar información que ayude a entender la relación de su microbiota con su historia de vida. Por ejemplo, en un estudio que publicamos en 2019 nos dimos cuenta de que las bacterias asociadas a algunas especies de murciélagos influyen en su conducta general, en su apareamiento y en el cambio de dieta en sus diferentes etapas reproductivas, pero también hemos observado que el estudio del microbioma puede darnos pistas de cómo han sido los procesos de especiación, por ejemplo en el murciélago magueyero *Leptonycteris yerbabuena* otra publicación en 2020.



Plática de educación ambiental. Fotografía: cortesía de Osiris Gaona.

Para responder las preguntas que nos planteamos durante nuestra investigación, algunas veces necesitamos tomar un pedacito de piel, y otras, heces fecales. Todas estas muestras diminutas las metemos en unos tubitos especiales y las transportamos en nitrógeno líquido al laboratorio. El nitrógeno líquido sirve para evitar la degradación del ADN. Luego, manteniendo la muestra fría, extraemos el material genético, específicamente el ADN, para analizarlo. Una manera de analizar el ADN es identificando la secuencia de genes particulares en la cadena, como por ejemplo el del 16S ribosomal región V4, que es un gen relevante porque ha sido muy estudiado y nos permite hacer comparaciones entre diferentes tipos de bacterias y arqueas. Aunque estas secuencias se obtienen de la piel o las heces de los murciélagos, podemos identificar en ellas las especies de bacterias presentes en la microbiota y así comenzar a entender esas simbiosis milenarias. Este estudio ha revolucionado el conocimiento de las especies al considerarlas como holobiontes, es decir, seres vivos: animal o planta junto con todos sus microbios simbiosis que funcionan como una unidad ecológica.

La idea del holobionte es un tema que se presta a discusión, toda vez que cuando surgió el concepto de la microbiota, cambió la percepción filosófica de lo que es un humano y de cualquier animal y vegetal. Esto sucedió cuando se descubrió que 50% de las células de nuestro organismo corresponde a microorganismos, la mayoría probablemente aún sin nombre científico.

Quizá los estudiosos de la vida podamos comenzar a entender esta idea de “ser holobiontes”, aunque también deberíamos discutir sobre el concepto “especie” y cambiar su idea original, definida como los miembros de poblaciones que se reproducen o pueden reproducirse entre sí en la naturaleza, y no de acuerdo a una apariencia similar, ya que, contrario a lo que la comunidad científica ha dicho, la evolución sucede en el holobionte. En este tema hay mucha tela para cortar y seguramente despertará el interés en conocer más sobre estas teorías.

Aterrizando ciencia

Como mi entusiasmo por los mamíferos alados es enorme, me gustaría que muchas personas los conocieran y los apreciaran. Una posibilidad es a través de los artículos de divulgación que he escrito sobre estos animales, tratando de comunicar ciencia para una gran diversidad de públicos y uniendo las dos áreas del conocimiento (la micro y la microbiología) de las que estoy enamorada. Un ejemplo es mi artículo “La microbiota: un paradigma revolucionario”, en el que explico la interacción del murciélago maguero y su microbiota. Otro ejemplo es “Alcahuetas del amor, las bacterias responsables de la atracción”, el papel de las bacterias como agentes de fermentación en el parche dorsal de los machos para atraer a las hembras.

Además de los murciélagos, en mis artículos de divulgación he abordado otros temas que son sujeto de estudio de mi equipo de trabajo. En particular sobre los estromatolitos, sin querer queriendo estuvimos en La Mañanera del presidente López Obrador, y ocupamos el número uno del top ten de los

artículos más leídos en 2022 en la revista Nexos con “Miradas impávidas ante la muerte de los siete colores de laguna Bacalar”, en el que hacemos un llamado a cuidar la laguna y señalamos las causas ambientales que pueden provocar daños irreversibles a los estromatolitos de la laguna Bacalar.

En otro artículo que titulé “La sopa amarilla” abordé el tema del remedio chino para restituir la microbiota con una sopa hecha de excremento.

Durante la pandemia me dio por escribir temas no científicos. Aunque no es parte de mi responsabilidad académica, ha sido importante integrarme a la sociedad yucateca a través de la Red Literaria del Sureste. Los caminos de la vida conducen a senderos inexplorados. Escribo porque escribir se me ha hecho un vicio, como diría Ruy Pérez Tamayo: *Inasibele cacoethes scribendi* (la incurable manía de escribir).

En los cuatro años y medio que el equipo de trabajo de la Dra. Falcón, estudiantes, posdoctorantes y yo hemos estado en la península, además de realizar investigación básica hemos dado talleres de divulgación de la ciencia en diferentes comunidades rurales para mujeres, escuelas primarias y jardines de niños, con el fin de sensibilizar a la población sobre la importancia que tienen los murciélagos en el ambiente y cambiar una visión negativa de ellos que se incrementó durante la pandemia. También hemos participado en diferentes eventos científicos y culturales que acercan la ciencia a la sociedad yucateca.

Uno de los programas que más me ha conmovido y gustado es el Programa de vocaciones científicas para niñas de Yucatán. En él, las académicas de la UNAM acogimos en laboratorios del campus Yucatán a una niña durante cinco meses y trabajamos con ella para desarrollar un proyecto científico. Fue realmente gratificante ver el entusiasmo de las chicas, ávidas de respuestas y de conocimiento. Considero que la interacción con ellas ha sido un gran acierto porque hemos inoculado en su vida una semillita de la ciencia, han sido partícipes en un estudio y, sin menoscabar su cultura y sus tradiciones, seguramente son ahora unas mujeres diferentes.

Además, hemos impartido talleres de educación ambiental sobre murciélagos y ratones en varias comunidades de Yucatán y Campeche.

Tejiendo comunidad

Por otra parte, hemos tejido redes con las y los colegas que llegaron antes que nosotros al campus de la UNAM en Mérida, pues sin su ayuda y solidaridad hubiera sido imposible avanzar. En particular Leticia Arenas, Joana Ortiz, Mónica Enríquez, Amanda Rodríguez, Gabriela Mendoza, Pavel Popoca y Francisco Chiappa desde entonces nos han arropado generosamente en sus recintos. Gracias a ellos pudimos continuar con nuestro trabajo porque nos dieron espacio, materiales y pusieron a nuestra disposición equipos. Además de todo, nos compartieron tips para conseguir desde el agua destilada hasta un técnico que salve nuestros equipos de los cambios constantes de voltaje, y nos proporcionaron las facilidades para que nuestras muestras y reactivos puedan “seguir

Talleres de educación ambiental sobre murciélagos y ratones impartidos en varias comunidades de Yucatán y Campeche

Lugar	Fecha	Primaria	Kínder	Núm. niños	Grado escolar	Actividades
Ucú, Yucatán	18/02/22	Felipe Alcocer Castillo		70	3º y 4º	Charla, cuestionario, materiales didácticos, red de niebla, infografía
Ucú, Yucatán	18/02/22		Kínder Nezahualcóyotl	30	Preescolar	Charla, materiales didácticos, red de niebla, infografía
Tizimín, Yucatán	15/03/22	Luis Álvarez Barret		89	3º y 4º	Charla, cuestionario, materiales didácticos, red de niebla, infografía
Zoh Laguna, Campeche	03/05/22	Héctor Pérez Martínez		130	2º, 3º, 4º y 5º	Charla, cuestionario, materiales didácticos, red de niebla, infografía

con vida”. Además de la parte estrictamente laboral, ha sido relevante sentir su calor humano, ya que, alejados de nuestras familias durante la pandemia, ellos se convirtieron en nuestros familiares más cercanos.

Es dura la migración, pero es menos difícil sabiendo que en la UNAM todos somos parte de una comunidad responsable y solidaria. En las redes que hemos tejido con diversos sectores de la sociedad civil y académica, hemos enarbolado la presencia del Instituto de Ecología en la península, integrándonos a algunos comités, participando también en entrevistas para diversos foros de radio y televisión y colaborando en diversos eventos organizados no solo por la UNAM, sino también en medios de varias partes de la península. Por ejemplo, participé para el podcast Science behind the glass (<https://t.co/y6GkCOSnjU>), en el que hablo de la familia y la academia, y para Sipse Noticias (<https://youtu.be/PJ86dhGiYL8?si=ExtnRIKjCmYMviEk>) conversé sobre la microbiota.

El número que no soy me hace expresar también lo complejo que, desde un principio, ha sido desarraigarse de la tierra donde nació, ya que lo primero que sucedió cuando llegué a la península fue la gran pandemia que paralizó al mundo entero. Durante estos cuatro años, muchas veces me he sentido sola y aislada entre las albarradas blancas de la península, otras tantas reflexiono sobre el porvenir y siento la mordedura de la distancia y la impotencia de no poder avanzar en el trabajo como deberíamos. En 2020 adquirí COVID-19 y durante mis días enferma recordaba

a Virginia Wolf y su ensayo sobre la enfermedad. También pensé en que no teníamos un espacio propio para poder pensar, crear, planear y desarrollar.

Si bien es cierto que todas las personas del laboratorio y yo hemos tenido el apoyo de nuestras autoridades, me parece pertinente señalar que se necesita una fuerza especial para levantarse y correr a las siete de la mañana para cambiar materiales biológicos y reactivos de un REVCO que ya no funciona porque el suministro eléctrico en la península no es ideal para esos equipos. También desanima haber perdido una plática porque no hay internet que sea capaz de aguantar a todos los que estamos conectados en una oficina, o por extraviarme en los caminos blancos del Mayab y tener que seguir adelante con una llanta ponchada y con documentos urgentes que llevar. Literalmente, debemos atravesar caminos blancos y manglares para llegar a un servicio de paquetería.

Pese a todo, no cambiaría por ningún motivo toda la experiencia que me ha llevado a crecer con mi número de académica. Ahora aprecio más a mi alma mater y me animo a esforzarme todos los días por el beneficio de compartir nuestro conocimiento y experiencia en ciencia a estas áreas de nuestro país que lo necesitan mucho.

Finalmente, el 28 de julio de 2023 se inauguró el edificio del Instituto de Ecología, UNAM-Unidad Mérida, y eso ha significado una alegría indescriptible porque así podremos incidir mejor en las políticas públicas y en la enseñanza de una sociedad

que ha estado muy alejada del centro de nuestro país. También es una oportunidad para aprender de una cultura milenaria, tratando de coadyuvar en la conservación de los ecosistemas, la restauración ecológica y la enseñanza para beneficio de la región. Por otra parte, la nueva sede del Instituto representa para nosotros un espacio creativo.

El día de la inauguración, varias de nosotras y nosotros no pudimos evitar llorar, lloramos de emoción porque se cristalizaba un sueño por el que nos habíamos aventurado. El camino vale la pena por todos los ángulos que se mire, aunque también podría haber sido diferente y más suave.

Creo profundamente que la Universidad Nacional Autónoma de México me ha salvado, como ha salvado a muchas personas que pisamos sus recintos escolares, y les digo, de estudiante y de académica sigo sintiendo la misma emoción, esa que al mismo tiempo golpea el estómago y el corazón cuando escucho un “Goya, Universidad”.

Osiris Gaona es bióloga egresada de la Facultad de Ciencias. Doctorado en Ciencias Biológicas por la UNAM. Se especializa en microbiota de vida silvestre con énfasis en murciélagos. Es académica de la Universidad Nacional Autónoma de México. Escribe divulgación de la ciencia para la revista NEXOS, UNAM-Mérida y otras revistas digitales. Le encantaría que todos supieran el valor de la biodiversidad como una fuente inagotable de inspiración.

Para saber más

- Gaona, O. 2021. La microbiota: un paradigma revolucionario. Nexos, Medio Ambiente.
- Gaona, O. 2023. Alcahuetas del amor, las bacterias responsables de la atracción. Nexos, Medio Ambiente.
- Gaona, O., Gómez-Acata, E. S., Cerqueda-García, D., Neri-Barrios, C. X., Falcón, L. I. 2019. Fecal microbiota of different reproductive stages of the central population of the lesser-long nosed bat, *Leptonycteris yerbabuena*. *PLoS One* 14 (7), e0219982.
- Gaona, O., Cerqueda-García, D., Falcón, L. I., Vázquez-Domínguez, G., Valdespino-Castillo, P. M., Neri-Barrios, C. X. 2019. Microbiota composition of the dorsal patch of reproductive male *Leptonycteris yerbabuena*. *PLoS One* 14 (12), e0226239.
- Gaona, O., Cerqueda-García, D., Moya, A., Neri-Barrios, X., Falcón, L. I. 2020. Geographical separation and physiology drive differentiation of microbial communities of two discrete populations of the bat *Leptonycteris yerbabuena*. *Microbiology Open* 9 (6): 1113-1127.
- Osiris Gaona, Alfredo Yanes-Montalvo, Miriam Guerrero, Luisa I. Falcón. 2022. Miradas impávidas ante la muerte de los siete colores de la laguna Bacalar. Nexos, Crisis Ambiental.
- Grice EA, Segre JA. 2011. The skin microbiome. *Nat Rev Microbiol* 9 (4): 244-253. doi: 10.1038/nrmicro2537. Erratum in: *Nat Rev Microbiol* 9 (8): 626. PMID: 21407241; PMCID: PMC3535073.
- Moya, A., Ferrer, M. 2016. Functional redundancy-induced stability of gut microbiota subjected to disturbance. *Trends in microbiology* 24 (5): 402-413.
- Sopa Amarilla. <https://mailchi.mp/0bd77ceda622/cuntame-conciencia-la-microbiota-y-el-trasplante-de-microbiota-fecal-la-sopa-amarilla>

De parásitos, biodiversidad y transformación de la naturaleza en tiempos de pandemia

Ella Vázquez-Domínguez

A casi cinco años del 2019, ustedes lectores y yo nunca hubiéramos imaginado que estaríamos confinados en la casa más de 18 meses por una pandemia resultado de una enfermedad respiratoria (COVID-19) transmitida por un virus (SARS CoV-2)—en otras palabras, un parásito— que tendría a la humanidad de cabeza y sin saber qué hacer. Por ello quiero platicarles un poco sobre la biodiversidad y su relación con el mundo de los parásitos, con el deseo de que reflexionemos, como humanidad, sobre nuestras acciones, que nos han llevado a éste que nos parece, como nunca antes, un mundo irreal.

La palabra parásito tiene un origen remoto, el vocablo griego παράσιτος que significa “comensal”, diríamos en México “gorrón”, y en la historia más reciente, el latín *parasitus*. En biología, parásito se define como un organismo —una especie— que vive a costa de otro organismo, es decir, obtiene un beneficio afectando o dañando al otro, aunque normalmente sin llegar a matarlo. Esta asociación en biología se clasifica como una interacción negativa, denominada *parasitismo*, en la que la especie que lleva a cabo el proceso se denomina *parásito* o *huésped* y la especie parasitada se llama *hospedador* u *hospedero*.

Hay varias clasificaciones de los tipos de parásitos: aquellos que viven dentro del hospedero son *endoparásitos*, mientras que los que infectan las capas superficiales de la piel se llaman *ectoparásitos*; los que matan al organismo en el que se hospedan son *parasitoides*. *Hiperparásito* es un parásito cuyo huésped es a su vez un parásito, comúnmente un parasitoide, lo cual es frecuente en insectos. Los parásitos también se dividen en obligados, es decir que necesitan un hospedero para sobrevivir, y facultativos, que son de vida libre pero que pueden parasitar a otro organismo cuando se dan las condiciones adecuadas. Los parásitos forman parte de diferentes grupos biológicos: los virus, por ejemplo los de la gripe; bacterias, como la de la peste, el cólera, la fiebre tifoidea, la tuberculosis; y algunos hongos, muy comunes como parásitos de diversos árboles pero también de animales. Irónicamente, entre las plantas y los animales existen respectivamente especies de plantas parásitas que parasitan otras plantas en raíces, hojas y tronco, por mencionar algunos, y muchísimas especies de animales, unicelulares y multicelulares, que parasitan a otros animales y algunas plantas.

Casi todos los animales y plantas poseen uno o varios parásitos, y los ejemplos forman una larguísima lista. En el caso de los animales, brevemente, tenemos por ejemplo a *Ascaris*

lumbricoides o lombriz intestinal, un parásito que vive en el intestino de los seres humanos que la adquieren sobre todo en sitios con poca salubridad. Las pulgas, garrapatas, piojos, etc., son ectoparásitos comunes en fauna silvestre como mamíferos y aves. Un organismo puede ser parasitado a lo largo de toda la vida, en diferentes fases de ella o solo en ciertas etapas. En este último caso, hay parásitos que a lo largo de la vida tienen que usar dos o más hospederos para completar su ciclo: son los parásitos generalistas, que pasan, por ejemplo, una etapa en un invertebrado, un molusco, y por último llegan al hospedero final, un mamífero, como es el caso de la duela del hígado (*Fasciola hepatica*), un platelminto tremátodo causante de la fasciolosis, una de las parasitosis más frecuentes del ganado.

Algo muy interesante de esta asociación es que el hospedero y el parásito se van adaptando a la par. El primero va generando diferentes mecanismos de defensa y el segundo aprende a lidiar con esas respuestas inmunitarias y, en general, con la vida parasitaria. Con frecuencia existe una estrecha correspondencia, como una llave y su chapa, y los parásitos pueden ser muy selectivos, de manera que casi todo animal y planta cuenta con al menos un parásito exclusivo, es decir, no parasita a ninguna otra especie.

Aunque pareciera sorprendente, los parásitos cumplen funciones muy importantes en los ambientes naturales gracias a las cuales los ecosistemas se mantienen saludables, por ejemplo, regulando las poblaciones de otras especies de animales (incluida la población humana). De tal manera que debemos apreciar que este tipo de interacciones negativas son parte fundamental de los ecosistemas naturales, aún a pesar de que algunos parásitos ocasionan diversas enfermedades que afectan al ser humano, a otros animales y también a las plantas.

Algunos ejemplos de parasitismo

De los múltiples casos que podemos encontrar en la naturaleza, ilustro con un par de ejemplos el fenómeno del parasitismo, uno que muestra la relación parásito-hospedero y enfermedades humanas, y otro sobre salud en fauna silvestre.

Mi primer ejemplo son los parásitos protozoarios en el género *Leishmania*, que provocan tremendas enfermedades de la piel, mucosas y órganos internos de humanos, conocidas en conjunto como *leishmaniasis*. La leishmaniasis es transmitida por

las hembras —¡sí, sólo las hembras!— de un grupo de mosquitos del género *Lutzomyia* en América, y del género *Phlebotomus* en Europa y Asia, cuyo hospedero primario incluye diversos vertebrados. Es de no creerse que los primeros recuentos escritos de sus síntomas datan de 1,500 a 2,000 años antes de la era común (a. e. c.). Actualmente la enfermedad (y por ende su vector y el parásito) está distribuida en todo el mundo, excepto en Australia y la Antártida. A pesar de que la enfermedad en ciertos casos puede curarse, sigue existiendo y afectando a las poblaciones más pobres del planeta, sobre todo por su estrecha relación con cambios ambientales, como la deforestación, la construcción de presas, los sistemas de riego y la urbanización.

El segundo ejemplo es el de los quitridiomycetos, los hongos más primitivos que se conocen. La mayoría de las especies de estos hongos son parásitas de plantas vasculares, de microorganismos acuáticos e, incluso, de otros hongos, incluidos otros quitridiomycetos. Una especie en particular, *Batrachochytrium dendrobatidis*, es un parásito mundialmente famoso porque es el agente causal de la enfermedad llamada *quitridiomycosis*. El hongo quitridiomyceto se caracteriza por tener una fase móvil infectiva y una fase sésil. La quitridiomycosis afecta a nivel de la piel a los anfibios, como las ranas, sapos y salamandras, y surgió simultáneamente en todos los continentes a partir de la década de 1970; se ha registrado en al menos 520 especies de anfibios en localidades montañosas en altitudes entre 1000 y 3500 msnm. Esta enfermedad ha causado el declive de poblaciones y especies de anfibios en todo el mundo. El cambio climático ha generado condiciones que favorecen el crecimiento del patógeno, mientras que la introducción de especies vectoras ha favorecido la dispersión de diversas cepas de *B. dendrobatidis*. Se conoce que los anfibios presentan ciertas estrategias de respuesta para la regulación de la infección, incluyendo una respuesta inmunitaria con síntesis y secreción de péptidos antimicrobiales, incremento de la tasa de muda de la piel y presencia de algunas bacterias que ayudan a eliminar el patógeno de la piel de los animales.

La relación entre parásitos y hospederos es verdaderamente fascinante, pues como mencionaba, los parásitos pueden parasitar a otros parásitos (aunque suene a trabalenguas). Quizá nos sorprenda que el escritor irlandés Jonathan Swift, autor de la sátira más famosa de su época, *Los viajes de Gulliver* (publicada en 1726), describe este fenómeno biológico de un parásito que es atacado por otro parásito en su obra *Sobre la poesía, una rapsodia* (1733):

So, naturalists observe, a flea
Has smaller fleas that on him prey;
And these have smaller still to bite 'em.
And so proceeds ad infinitum.

El “efecto de dilución” y la paradoja de la biodiversidad

La diversidad de formas de vida —biodiversidad, diversidad biológica— domina en todos los reinos: plantas (reino Plantae),

animales (reino Animalia), hongos (reino Fungi) y protozoarios (reino Protista), así como bacterias y arqueas; incluye además los diferentes niveles que la componen, desde ecosistemas, comunidades, poblaciones e individuos, hasta sus genes, así como la agrobiodiversidad (especies domesticadas, como el maíz) y la diversidad cultural.

En los últimos 70 años hemos visto una cada vez más dramática pérdida de biodiversidad a escala mundial, con mayor predominancia en zonas tropicales y en países en desarrollo. Son múltiples las causas de dicha pérdida, pero las más significativas son modificación del entorno y transformación del hábitat asociadas con la agricultura/ganadería, deforestación y urbanización. No es casualidad —aunque no parezca obvio— que así como ha disminuido la biodiversidad, se han incrementado las enfermedades infecciosas asociadas con parásitos patógenos (aquellos que afectan la salud) y que son transmitidas por animales, conocidas como enfermedades zoonóticas. La zoonosis, del griego ζῷον, animal, y νόσος, enfermedad, es cualquier enfermedad infecciosa que se transmite de los animales no humanos (en su mayoría vertebrados) al ser humano y viceversa. Efectivamente, ¡nosotros los humanos también podemos transmitir enfermedades infecciosas a los animales, silvestres y domesticados! . Un ejemplo reciente sucedió en monos verdes (*Chlorocebus sabaues*) en Gambia, quienes adquirieron de los seres humanos la bacteria *Staphylococcus aureus*, que causa diversas enfermedades infecciosas. Dicha transmisión fue resultado de la invasión por el humano del hábitat natural de los monos.

Pero regresemos a la relación entre la diversidad de animales (hospederos) y la diversidad de parásitos, que se traduce en un “efecto de dilución”. Quisiera ejemplificar con una enfermedad de la que todos hemos escuchado, la del virus del Nilo Occidental, que es transmitida por un mosquito del que algunas aves son reservorio natural. Si en un ecosistema disminuye la diversidad de especies de aves y predomina una (muchos individuos de la especie que hospeda al virus), esto a su vez favorece que proliferen los moscos que transmiten el virus y, por lo tanto, que haya mayor transmisión. Si, por el contrario, hay una mayor diversidad de aves, normalmente hay pocos individuos de la especie portadora del virus en un área determinada. Eso tiene como consecuencia que también haya pocos mosquitos y, por lo tanto, menor potencial de transmisión. Si generalizamos, esto significa que cuando hay una gran diversidad de especies silvestres (de flora, fauna, microorganismos, etc.) en un ecosistema, muchas de ellas no “hospedan” a los parásitos y el potencial de transmisión está diluido en el ecosistema.

Dicho estado de equilibrio sucede de manera natural si los ecosistemas están en buen estado de conservación. Quebrantar ese equilibrio y mantener una relación depredadora e insostenible entre la humanidad y la naturaleza nos ha traído consecuencias negativas. Para muestra, un botón: la pandemia que estamos viviendo. ¿Pero por qué es eso? El virus, un parásito denominado por los científicos SARS CoV-2, de la familia de los coronavirus, es el que provoca la COVID-19, enfermedad que sabemos se

ha diseminado a nivel de pandemia y es de origen zoonótico. La pérdida de biodiversidad y transformación de la naturaleza provoca, como ya decía, que algunas especies proliferen (en este ejemplo, como las portadoras de coronavirus). Otra consecuencia de este efecto de dilución es que se incrementa el contacto entre dichas especies (junto con sus microbiomas y enfermedades) y los humanos. Esto es, cuando nosotros alteramos el entorno y anulamos la frontera entre las zonas naturales y las que habitamos, el resultado es que se facilita el contacto directo entre nosotros —así como el de nuestras mascotas y animales de granja— y la fauna silvestre y, por ende, aumenta el potencial de transmisión de enfermedades infecciosas. La zoonosis se facilita también por la sobreexplotación, la caza y el tráfico ilegal de fauna silvestre; cabe resaltar que el tráfico ilegal es la segunda mayor causa de pérdida de la biodiversidad.

La historia de los coronavirus

Para entender mejor la relevancia de los coronavirus como enfermedades zoonóticas es necesario conocer un poco de su historia. Existen cerca de 40 especies de coronavirus y se estima que su ancestro común más reciente existió desde el siglo IX a. e. c. De estas 40 especies de coronavirus, cuatro son las responsables del 15% de los resfriados comunes en humanos y fueron descubiertas apenas entre 1966 y 2004. En esos estudios se observó que su origen evolutivo viene de diversos vertebrados, en particular de murciélagos y roedores. Es importante resaltar que “origen evolutivo” implica que los coronavirus que se identificaron en esos animales no son los que afectan al humano; para que así suceda tienen que pasar por otros hospederos, que pueden ser vacas, camellos y alpacas, en el caso específico de estos cuatro coronavirus, y como en el caso de SARS CoV-2, en otras especies aún no identificadas. Los coronavirus pueden tener múltiples mutaciones durante los ciclos de vida dentro de los hospederos. La acumulación de mutaciones es un proceso de la evolución y es la manera en que los coronavirus pueden llegar a ser transmisibles al humano. En resumen, no es posible concluir que un coronavirus que tiene un murciélago, con el cual convive sin problema, es el que directamente infecta al humano (véase *Murciélagos y SARS CoV-2: preguntas y respuestas en Oikos=* 24, 2020).

Lo anterior me lleva a otro fenómeno que es verdaderamente alucinante en la naturaleza: los murciélagos, por su condición de mamíferos voladores, invierten mucha energía en el vuelo; por ello su metabolismo es muy, muy acelerado, y tienen una temperatura corporal entre 38 y 41 °C. Su temperatura tan alta es como si tuvieran “fiebre” permanentemente, lo que hace a su sistema inmunitario muy eficiente; en consecuencia, los patógenos que han evolucionado en los murciélagos pueden soportar altas temperaturas. Esto conlleva un problema para los humanos, ya que nuestra temperatura normal es de 36 a 37 °C y nuestro sistema inmunitario “utiliza” altas temperaturas —nos da fiebre— para defenderse de los virus, una defensa que entonces no funciona ante ciertos coronavirus.

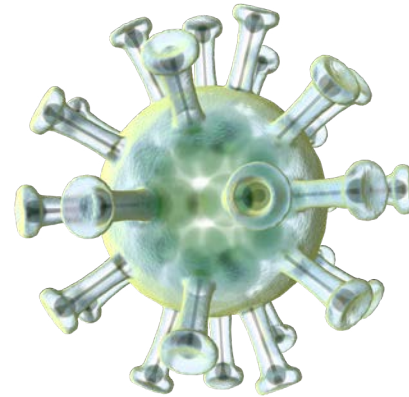


Ilustración en 3D del coronavirus SARS CoV-2. Via Commons Wikimedia.

La urgente conservación de los ecosistemas

Lo que hemos vivido con la pandemia ahora se manifiesta como una necesidad imperante de mantener los ecosistemas en buen estado de conservación y de restaurar muchos de los que hemos transformado, no solo por una larga lista de razones éticas, estéticas y económicas, sino también “por razones de salud humana”. En este contexto, podemos relacionar la urgencia de conservar los ecosistemas con una “paradoja de la biodiversidad” que asocia los conceptos “peligro” y “riesgo”. Para explicarla es necesario imaginar una zona en el mar donde hay muchísimos tiburones; ésta representa gran peligro, es decir, existe un enorme potencial de daño si quiero nadar en ese lugar. El que me meta a nadar a pesar del peligro manifiesto implica un alto riesgo, es decir, existe una alta probabilidad de que el peligro efectivamente me cause daño (que sea atacada por tiburones). Y quizá se pregunten cómo se relaciona esto con los parásitos y la biodiversidad. Se relacionan de manera muy directa: en cuanto al fenómeno de dilución ya comentado, si en un ecosistema la diversidad de especies es baja, la diversidad de virus patógenos también lo es, y como resultado, aumenta el riesgo (a pesar de que el peligro sea bajo) de que salten de la fauna silvestre a nosotros. Recuerden que aunque la diversidad de especies sea baja, eso no significa que también haya pocos virus, pero sí implica que los que hay son muy abundantes, lo cual facilita e incrementa la transmisión. Ergo: es mejor tener una alta diversidad de especies silvestres en un ecosistema, incluyendo sus parásitos, para nuestra propia salud. Esto implica que, aunque el peligro sea alto, la probabilidad de que el peligro efectivamente cause daño es baja, es decir, el riesgo es menor.

Arnoldo Kraus, médico y escritor de la Facultad de Medicina de la UNAM, recientemente dijo que “hay dos pandemias, la del coronavirus y la humana. Cuán torpe es nuestra especie —su condición humana— que siembra y arrasa, que construye y destruye”, y yo añado “a la naturaleza, a la biodiversidad”.

Quiero concluir con estas ideas sobre parásitos y pandemias del coronavirus y lo que han venido a representar, en tan poco tiempo, en nuestras vidas:

¿Nos ayudará a reflexionar sobre la relación que mantenemos con la naturaleza? ¿Logrará que, como especie, modifiquemos nuestras prioridades?

Ella Vázquez-Domínguez obtuvo el título de bióloga de la Facultad de Ciencias de la UNAM y realizó su doctorado en el Centro de Ecología (hoy Instituto, IE) de la UNAM. Actualmente, es Investigadora titular C del Departamento de Ecología y Biodiversidad del mismo IE. Sus líneas de investigación incluyen principalmente la ecología molecular y urbana, genética y genómica de poblaciones y del paisaje, evolución y conservación de fauna (evazquez@ecologia.unam.mx).

Para saber más

- Cox F.E.G. 2002. History of Human Parasitology. *Clin Microbiol Rev* 15: <https://doi.org/10.1128/cmr.15.4.595-612.2002>
- Koonin, E., Krupovic, M. 2016. A parasite's parasite saves host's neighbours. *Nature* 540: 204-205.
- Poulin, R. 2007. Evolutionary ecology of parasites. Princeton University Press. ISBN 978-0-691-12085-0
- Swift, J. 1733. On Poetry: A Rapsody.
- Zimmer, C. 2001. Parasite Rex. Free Press. ISBN 978-0-7432-0011-0

Las plantas en un mundo cambiante: estrés y genética

Mario Gutiérrez Rodríguez y Adriana Garay Arroyo

Las consecuencias del cambio climático —la variación del clima en todo el mundo— son cada vez más evidentes en todos lados. Uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en este momento, es cómo mitigar estas consecuencias y, a largo plazo, revertirlas. En particular, el denominado calentamiento global ha incrementado la pérdida de biodiversidad, ha hecho que los inviernos sean más severos, que haya más olas de calor y tormentas más agresivas y que surjan nuevas enfermedades. Es frecuente ver en los titulares de los medios de comunicación de todo el mundo noticias acerca de eventos climáticos y ecológicos cuyos efectos percibimos como catástrofes. Por ejemplo, la sequía, que esta presente en varios países, actualmente no solo afecta el funcionamiento de los organismos y los ecosistemas, sino que podría afectar, en un futuro no tan lejano, la producción de alimentos para la humanidad ya que la sequía prolongada puede llevar a una escasez de agua y a la pérdida de cultivos.

Específicamente en México, que en general es un país seco, el aumento en la temperatura del planeta está haciendo que aumente la sequía, y aunque parezca contradictorio, también las inundaciones. En el año 2021, vimos en México un periodo de sequía intenso en abril y meses después tuvimos unas inundaciones muy fuertes. Además, en lo que va de este año 2024, hemos observado un incremento notable en la temperatura de varias ciudades de nuestro país. Algunas de estas ciudades han registrado temperaturas extremas, alcanzando los 50°C en lugares como Mérida.

Las plantas desempeñan un papel primordial en la vida del planeta, principalmente debido a que ayudan a mitigar el cambio climático al fijar el CO₂, retener el agua en el suelo y mejorar la estructura del mismo promoviendo la retención de agua y reduciendo la erosión. Así mismo, las plantas se utilizan para brindar alimentación, refugio y vestimenta a una gran cantidad de organismos, entre los cuales nos encontramos nosotros. Por todas estas razones, las plantas van a desempeñar un papel fundamental en las estrategias futuras para contender con el cambio climático.

En un mundo cambiante como el que estamos viviendo, las plantas también se enfrentan a diferentes tipos de estrés ambiental. Este estrés puede provenir de cambios en factores abióticos, como la disponibilidad de agua o las variaciones de temperatura, así como de factores bióticos, como es la presencia de patógenos, entre otras cosas. Estas condiciones adversas tam-

bién pueden afectar el crecimiento, la productividad y la salud en general de las plantas. Por suerte, las plantas han desarrollado mecanismos para lidiar con esos factores estresantes y la genética desempeña un papel fundamental en esa respuesta. Por eso, científicos de todo el mundo estamos tratando de entender los mecanismos moleculares con los que las plantas responden a diferentes condiciones estresantes y estamos desarrollando estrategias que permitan la mejor adaptación de las mismas a las condiciones ambientales cambiantes. Estudiar cómo las plantas perciben y responden al estrés a nivel molecular, nos ayuda a identificar genes y rutas metabólicas que son clave en la tolerancia al mismo.

En nuestro caso, en el laboratorio de Genética Molecular, Epigenética, Desarrollo y Evolución de Plantas, del Instituto de Ecología de la UNAM, estamos analizando la función de algunos genes relevantes para el desarrollo de la raíz, que es el órgano encargado de la absorción de agua, y de cómo podrían participar en la respuesta a la falta de la misma. Llevamos a cabo este trabajo en una planta modelo llamada *Arabidopsis thaliana* (Arabidopsis, de aquí en adelante), utilizada por investigadoras e investigadores de todo el mundo para comprender cómo funcionan las plantas a nivel genético y molecular. De esta manera, estamos construyendo un punto de partida para que en el futuro otros científicos puedan aplicar el conocimiento en plantas de interés agrícola, en particular las que forman parte de la alimentación de nuestra población, como son los frijoles, el arroz o el maíz.

¿Cómo toman y cómo mantienen el agua las plantas?

Las plantas que denominamos vasculares poseen un tejido especializado para transportar tanto el agua como los nutrientes llamado *tejido vascular*. Las plantas absorben el agua mediante el proceso denominado *ósmosis*, que en general ocurre cuando dos soluciones con concentraciones distintas están separadas por una

Plantas vasculares

Son todas aquellas que tienen un tejido especializado de soporte y transporte de agua. llamado xilema, y un tejido conductor de nutrientes, llamado floema. Estas plantas son, por ejemplo, las angiospermas (plantas con flor), las gimnospermas (como los pinos) y los helechos.

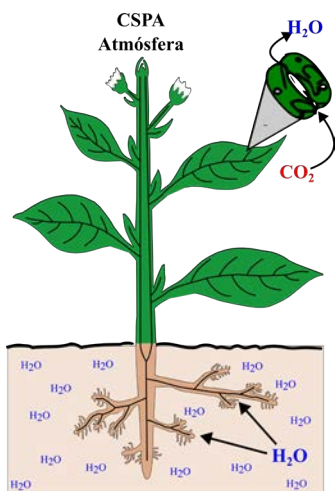


Figura 1. Mecanismo SPAC. En el continuo *suelo-planta-atmósfera* (SPAC), el agua sale a la atmósfera en forma de vapor a través de los estomas. De esta forma se promueve la absorción de agua líquida que está en el suelo y entra por ósmosis a las raíces. Una vez que el agua está en el tejido de las raíces, se mueve por el sistema vascular de la planta para llegar a tallo y hojas.

Ilustración: elaboración propia

membrana semipermeable, que permite el intercambio de agua y ciertas moléculas pequeñas. De esa manera, el agua se mueve pasivamente a través de la membrana del sitio de mayor al de menor actividad del agua, hasta equilibrar las actividades del agua en ambos lados. En el caso de las plantas, el agua se mueve del suelo, donde la concentración de agua es mayor en condiciones óptimas de riego, hacia las raíces de las células, donde la concentración de agua es menor. Este proceso de ósmosis se puede observar fácilmente en casa si se pone una verdura en una solución con sal como por ejemplo, un pepino: después de un momento el pepino se arruga porque pierde agua por ósmosis, mientras la sal alrededor de la verdura se va mojando.

Una gran cantidad de toda el agua que absorben las plantas ingresa a través de sus raíces. En la raíz, el agua debe atravesar por ósmosis distintas capas celulares que van desde la parte externa de la planta al interior, donde se encuentra el tejido vascular. Ya en el tejido vascular, el agua se mueve contra la gravedad por el *xilema* de la raíz hasta las hojas formando una columna de agua continua que va del suelo a la planta a la atmósfera (SPAC, de continuo suelo-planta-atmósfera; figura 1). En este continuo, el agua que llegó a las células del tejido vascular se mueve hacia arriba debido tanto a la evaporación del agua en las hojas durante la transpiración como a la cohesión entre las moléculas del agua. Es decir, al evaporarse el agua de la superficie de las hojas, “jala” las moléculas de agua de la parte de abajo de la planta para reemplazar las moléculas que se van evaporando. Esta capacidad de transporte de agua permite que una planta tan alta como una sequoia que llega a medir 100 metros, pueda mantener el flujo del agua desde su raíz hasta sus hojas.

Este consumo y posterior transporte del agua no sólo le sirve a la planta para hidratarse y poder crecer, sino que también es esencial para llevar a cabo la fotosíntesis. Durante la fotosíntesis la planta utiliza el H_2O que se adquirió originalmente por ósmosis y produce oxígeno molecular (O_2) que es indispensable para la vida como la conocemos ahora (figura 1).

Las plantas responden a diferentes niveles (fisiológico, morfológico o genético) para adaptarse a una condición de sequía y mantener su crecimiento y productividad en estas condiciones de estrés hídrico (figura 2). Una de las respuestas fisiológicas que evita la transpiración del vapor de agua que está en el SPAC y ayuda a retener el agua cuando las plantas se encuentran en una situación de sequía, es cerrar los estomas. Los estomas son poros localizados en las hojas por donde sale el agua y entran o salen diferentes tipos de gases, como son el CO_2 y el oxígeno (figura 1).

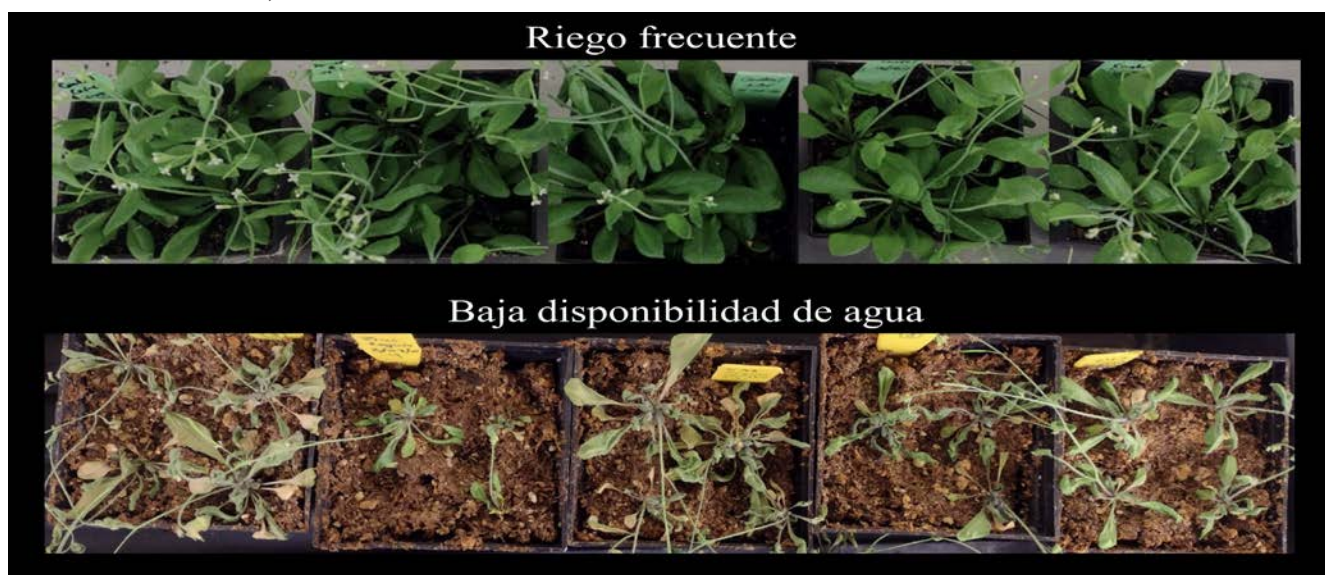


Figura 2. *Arabidopsis thaliana* con riego frecuente y con baja disponibilidad de agua. El estrés hídrico provoca que las hojas se enrollen, se pierda biomasa y clorofila, además de que disminuye la tasa fotosintética y el crecimiento de la planta. Fotografías: experimentos de sequía en *Arabidopsis* realizados en el Laboratorio de Genética Molecular, Epigenética, Desarrollo y Evolución de Plantas del Instituto de Ecología, UNAM.

Por otro lado, a nivel morfológico, algunas plantas que están en estrés por falta de agua, enrollan las hojas o las tiran, engrosan la cutícula de las hojas o producen una mayor cantidad de pelos o tricomas, probablemente para que haya menos superficie de contacto con el medio ambiente.

A nivel genético, algunos grupos de investigación han logrado describir mecanismos moleculares centrales que ayudan a explicar la respuesta de las plantas a la sequía y cómo pueden crecer en estas condiciones de estrés. Estos mecanismos involucran la expresión o inhibición de una gran cantidad de genes que están regulados por *Factores de Transcripción* (FTs). Muchos de estos genes codifican para proteínas que participan en la respuesta regulando diferentes procesos para enfrentar la condición de estrés. Por ejemplo, algunos de los genes que se regulan codifican para proteínas que funcionan: 1) como canales de agua (denominados acuaporinas) que permiten la entrada y salida de estas de las células, 2) protectores de macromoléculas (como las proteínas LEA) y 3) otros FTs. Además, es importante tener en cuenta que la interacción entre la genética y el medio ambiente en el cual crecen las plantas es compleja y diferentes combinaciones genéticas pueden ser más efectivas en ciertos entornos que en otros.

¿Cómo detectan el estrés las plantas?

Aunque compleja, la respuesta de las plantas a una condición ambiental específica es fascinante ya que en ella se integra desde la percepción del estrés a una respuesta coordinada global de crecimiento y mantenimiento diferencial de tejidos y células. Como

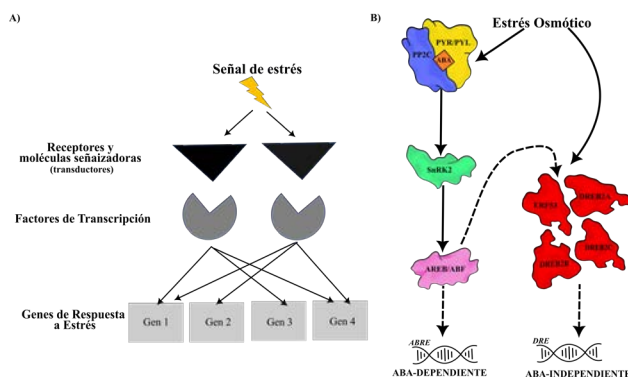


Figura 3. **A)** Ruta de señalización general en plantas. La señal de estrés externa es percibida por receptores y comunicada por moléculas señalizadoras (transductores), las cuales activan a los *factores de transcripción* (FTs) que se encargan de prender a los genes de respuesta al estrés. **B)** Vías de señalización en la respuesta a estrés osmótico en *Arabidopsis*. En la vía *ABA-dependiente* (primera "columna"), los FTs AREB/ABF, activados por la fosforilación de cinasas *SnRK2*, promueven la transcripción de genes que tienen motivos ABRE en sus promotores. En la vía *ABA-independiente* (segunda "columna"), factores de transcripción de la familia AP2/ERF promueven la expresión de genes con caja DRE. Ilustración: elaboración propia.

sabemos, las plantas son organismos sésiles, o sea que no tienen la capacidad de desplazarse de un lugar desfavorable (en este caso muy seco) a otro más favorable (en el que no haya escasez de agua), así que no pueden huir de amenazas externas como lo hacen los animales. Las plantas deben enfrentar las condiciones adversas del entorno por lo que a lo largo de la evolución, han desarrollado mecanismos internos que les permiten sobrevivir y adaptarse a diferentes tipos de estrés, incluyendo los relacionados con la sequía.

Las plantas responden de manera diferente a las diversas condiciones ambientales en las que crecen, y eso lo logran detectando el tipo de estrés de manera diferencial y activando vías *intracelulares* (dentro de la célula) de respuesta específica. Una vez que se percibe la condición de estrés, la planta tiene que responder de manera coordinada para asegurar su sobrevivencia, por lo que es indispensable que esa información se transmita lo más pronto posible.

En condiciones de sequía, la planta percibe la falta de agua principalmente por sus raíces. Esta información se transmite de la raíz a la parte aérea mediante varios mecanismos, entre ellos, el movimiento de una fitohormona llamada *Ácido Abscísico* (ABA) hacia las hojas. Por otro lado, se activan vías dentro de la célula, que terminan en la activación de diferentes genes que codifican para diversas proteínas. Entre estas proteínas se encuentran los factores de transcripción (FTs), que se unen al ADN para regular la expresión de una gran cantidad de genes que, a su vez, pueden estar regulando programas de desarrollo completos que permiten a la planta enfrentar a la condición de estrés.

La falta de agua, las plantas y el cambio climático

En el contexto del cambio climático y el calentamiento global, el estudio de la respuesta genética al estrés hídrico en *Arabidopsis* adquiere una relevancia crucial. Como mencionamos al principio de este artículo, las sequías y la falta de agua se han vuelto cada vez más frecuentes y severas debido al cambio climático, lo que representa una amenaza significativa para la agricultura y la seguridad alimentaria a nivel mundial. Comprender los mecanismos moleculares y las vías de señalización involucradas en la respuesta de las plantas al estrés hídrico es fundamental para desarrollar estrategias de adaptación y mitigación en un escenario de escasez de agua. El estudio de *Arabidopsis*, un modelo vegetal ampliamente utilizado por la comunidad científica, nos proporciona información invaluable sobre los procesos y las proteínas clave que intervienen en la adaptación de las plantas a condiciones de sequía.

Se han descubierto en *Arabidopsis* dos vías intracelulares de respuesta a estrés por una baja en la disponibilidad de agua: las vías dependiente e independiente de ABA (figura 3). Se sabe que la concentración de ABA aumenta cuando las plantas están estresadas por falta de agua, y eso se percibe dentro de la célula gracias a un conjunto de proteínas, llamadas PYR/PYL (proteína amarilla en la figura 3), que funcionan como receptores de esta hormona. Resulta interesante que en experimentos de laboratorio se haya visto que si se elimina la función de las proteínas PYR/PYL, las plantas tienen problemas de crecimiento (son más pequeñas

de lo normal) y son incapaces de sobrevivir en condiciones con poca agua. Además, se ha documentado que aquellas plantas que no detectan el ABA producido como consecuencia de un estrés por falta de agua, no mandan la señal intracelular que lleva a la expresión de genes de respuesta a esta condición de estrés, y entre otras cosas, no cierran sus estomas y siguen perdiendo agua aun cuando hay poca disponibilidad de la misma.

Hay otras proteínas de esta vía de señalización intracelular, como las fosfatasa PP2C (proteína morada, en la figura 3), que funcionan como inhibidoras de la respuesta a estrés osmótico ya que inhiben la actividad de las cinasas SNRK2 (proteína verde claro en la figura 3). Cuando las fosfatasa PP2C liberan las cinasas SNRK2 (verde claro en figura 3), éstas retoman su actividad para activar proteínas como los FTs AREB/ABF (en rosa en la figura 3). También se ha visto que las plantas que no tienen la función de las proteínas PP2C tienen una mayor sensibilidad a ABA y, en consecuencia, un mayor nivel de inducción de genes de respuesta a deshidratación. En otras palabras, estas plantas tienen una respuesta a estrés exacerbada, lo cual no siempre es bueno pues, aunque tienen una gran capacidad para responder a un estímulo de estrés hídrico, esta misma respuesta ocasiona problemas en el crecimiento de la planta, volviéndola más pequeña de lo usual.

Por su parte, los FTs AREB/ABF reconocen una secuencia conservada llamada ABRE (del inglés ABA-responsive element) (en blanco y negro sobre el ADN en la figura 3) que se encuentra en regiones regulatorias de numerosos genes involucrados en promover respuestas para sobrevivir a la baja disponibilidad de agua. De hecho, las plantas que no tienen la función de estos FTs son más sensibles a la sequía y mueren en una mayor proporción que las plantas silvestres después de unos 12 días sin agua. Además, debido al estrés, el ABA afecta menos el crecimiento de la raíz porque la ausencia de estas proteínas no permite que la señal de la hormona llegue hasta el final de la vía de transducción y active genes que detengan el crecimiento de la raíz.

Aunque estos avances en la investigación pueden parecer lejanos a la gran mayoría de las personas, no hay duda de que ayudarán en el futuro desarrollo de estrategias de cultivo más resistentes a la sequía. Además, contribuirán a mejorar la seguridad alimentaria en un mundo afectado por escasez de agua y condiciones climáticas extremas.

Adaptaciones de las plantas a una situación de baja disponibilidad de agua

En la investigación, una forma de encontrar genes que sean relevantes para responder a una situación dada es usar mutantes de

Genes ortólogos

Un gen *ortólogo* es un gen que ha evolucionado en dos especies diferentes a partir de un ancestro común a través de especiación. Generalmente estos genes tienen funciones similares o idénticas en ambas especies.

Proteínas que participan en la respuesta a sequía

PYR/PYL. Receptores de la fitohormona ácido abscísico. Perciben ácido abscísico posterior a un estímulo de estrés hídrico y comienzan la señalización de respuesta a estrés.

SnRK2. Proteínas del tipo cinasas, es decir, adicionan grupos fosfatos a otras proteínas. En este caso, las cinasas regulan positivamente la respuesta a estrés.

PP2C. Proteínas del tipo fosfatasa, es decir, eliminan grupos fosfatos de otras proteínas. En este caso, estas fosfatasa regulan negativamente la respuesta a estrés.

AREB/ABF. Proteínas del tipo factores de transcripción, es decir, participan en la regulación de la transcripción. Estos factores de transcripción promueven la expresión de genes que participan en la respuesta a estrés dependiente de ácido abscísico.

XAL1. Factor de transcripción de la familia MADS que participa en el desarrollo de la raíz y la respuesta a estrés hídrico en Arabidopsis.

OsMADS26. Factor de transcripción de la familia MADS, ortólogo de XAL1, que participa en la respuesta a estrés hídrico en arroz.

esos genes, con nivel de expresión bajo o nulo, y ver si cambia la respuesta de la planta en una cierta condición de crecimiento.

En nuestro laboratorio estudiamos los genes MADS—una familia de genes que codifican para factores de transcripción, que tienen funciones relevantes en el desarrollo de las plantas— para entender cómo participan en la respuesta al estrés abiótico, específicamente por falta de agua. Nosotros caracterizamos la función de un gen que denominamos XAANTAL1 (por su vocablo en maya que quiere decir “ir más lento” y abreviado XAL1) como promotor del crecimiento de la raíz primaria de Arabidopsis. Hemos observado a partir de datos de secuenciación masiva del ARN (ácido ribonucleico), que XAL1 inhibe la expresión de varios genes descritos como de respuesta a distintos tipos de estrés que generan un déficit de agua.

Actualmente trabajamos con experimentos de deshidratación, como el que se muestra en la figura 2. Además, hacemos ensayos de crecimiento de la raíz bajo tratamientos de estrés con manitol (una azúcar alcohólica), sal (cloruro de sodio) y ABA añadido de manera exógena, con la finalidad de determinar cómo contribuye XAL1 en la respuesta a este tipo de estrés. Finalmente, se ha descrito que el homólogo (técnicamente denominado ortólogo) de XAL1 en arroz es OsMADS26 y no solo se expresa cuando hay poca agua disponible, sino que es importante para responder a la sequía tanto en el laboratorio como en el campo.



Nuestras observaciones preliminares muestran que XAL1 también participa en la tolerancia a la baja disponibilidad de agua no solo en arroz sino también en *Arabidopsis*.

El estudio de la respuesta genética al estrés hídrico en *Arabidopsis* no sólo es fundamental para comprender los mecanismos de adaptación de las plantas en general a la sequía, sino que también proporciona conocimientos valiosos para abordar los desafíos del cambio climático y el calentamiento global.

Conclusiones y perspectivas

Las temporadas de sequía cada vez son más severas y frecuentes y afectan a los ecosistemas y a nuestra agricultura. En la actualidad es especialmente relevante buscar soluciones que hagan frente al problema de la reducción en la disponibilidad de agua de forma eficiente e inteligente.

En este sentido, una de las estrategias más sensatas es probablemente el estudio de las redes genéticas que están detrás de las respuestas de las plantas a la sequía y a diferentes formas de estrés que bajan la disponibilidad del agua, y de cómo estos grupos de genes repercuten en su desarrollo y en la producción de los alimentos. Pero no nos referimos solamente a la posible elaboración de organismos transgénicos —ya que es un tema complejo en sí mismo que necesita su propia discusión—, sino también a la creación y desarrollo del conocimiento científico básico que, en un futuro, será de utilidad para enfrentar problemas provocados por el cambio climático, como la afectación en las poblaciones de plantas y ecosistemas, así como en cultivos de consumo humano.

Conocer los mecanismos moleculares que las plantas emplean ante la baja disponibilidad de agua brinda información acerca de los elementos genéticos y fisiológicos suficientes y necesarios que una planta necesita para sobrevivir y reproducirse y, al mismo tiempo, cuáles son aquellos que la hacen más o menos tolerante. Además, con este desarrollo de conocimiento fundamental sobre la genética molecular estamos, por fin, comenzando a entender la relación que tiene el genotipo con el ambiente y cómo esto afecta la distribución y la evolución de las plantas.

Finalmente, con la investigación de los mecanismos moleculares involucrados para entender este tipo de estrés también se pretende comprender la complejidad de los redes genéticas dentro del desarrollo de las plantas y sus estrategias de supervivencia.

Mario Gutiérrez Rodríguez es biólogo egresado de la Facultad de Ciencias de la UNAM. Actualmente estudia la Maestría en Ciencias Biológicas en el Instituto de Ecología de la misma universidad. Su principal interés son las redes genéticas en plantas y su adaptabilidad a condiciones de estrés hídrico.

Adriana Garay Arroyo es investigadora del Instituto de Ecología de la UNAM y trabaja en el Laboratorio de Genética Molecular, Epigenética, Desarrollo y Evolución de Plantas. Estudia la función de los genes MADS en el desarrollo de la raíz primaria y le interesa la biología molecular y el desarrollo de las plantas.

Para saber más

- Castelán-Muñoz N, Herrera J, Cajero-Sánchez W, Arrizubieta M, Trejo C, García-Ponce B, Sánchez MP, Álvarez-Buylla ER, Garay-Arroyo A. 2019. MADS-Box Genes are key components of genetic regulatory networks involved in abiotic stress and plastic developmental responses in plants. *Front Plant Sci* 10: 853. doi: [10.3389/fpls.2019.00853](https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00853)
- Gutiérrez Rodríguez, MA. 2022. Identificación de los genes blanco de XAL1 que participan en la respuesta a condiciones de estrés osmótico en la raíz de *Arabidopsis thaliana*. [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México UNAM.
- Chaves MM, Pereira JS, Maroco J, Rodrigues ML, Ricardo CPP, Osório ML, Carvalho I, Faria T, Pinheiro C. 2002. How plants cope with water stress in the field? photosynthesis and growth. *Annals of Botany* 89: 907-916. <https://doi.org/10.1093/aob/mcf105>
- Skelton. R. 2015. How plants respond to drought provides insights into climate change survival. The Conversation: <https://theconversation.com/how-plants-respond-to-drought-provides-insights-into-climate-change-survival-44017>
- Tapia-López R, García-Ponce B, Dubrovsky JG, Garay-Arroyo A, Pérez-Ruiz RV, Kim SH, Acevedo F, Pelaz S, Alvarez-Buylla ER. 2008. An AGAMOUS-related MADS-box gene, XAL1 (AGL12), regulates root meristem cell proliferation and flowering transition in *Arabidopsis*. *Plant Physiol* 146: 1182-92. doi: [10.1104/pp.107.108647](https://doi.org/10.1104/pp.107.108647)

El mundo oculto de los microorganismos marinos: el ciclo del nitrógeno en ambientes pobres en oxígeno y el cambio climático

Silvia Pajares Moreno

Un mar de microbios

¿Sabías que los océanos son el mayor ecosistema del planeta y que los microbios representan más del 90% de toda su biomasa viva?. Los ambientes marinos, desde su superficie soleada hasta su fondo frío y oscuro, y desde los trópicos hasta los polos, están llenos de vida microbiana. Una sola gota de agua de mar contiene miles de organismos microscópicos flotantes que reciben el nombre de plancton y comprenden desde virus, bacterias y arqueas hasta organismos eucariontes.

La importancia numérica y la gran diversidad de estos microbios marinos se manifiesta en su relevancia ecológica y biogeoquímica. Los microbios planctónicos forman la base de la red alimentaria marina, realizan la mayor parte de la producción primaria global, producen más de 50% del oxígeno que respiran todos los organismos aerobios de la Tierra y son los motores que impulsan los diferentes ciclos de nutrientes en el océano.

Los microorganismos que participan en el ciclo del nitrógeno son, además, fundamentales para la salud de nuestro planeta, especialmente aquellos que habitan en los sistemas marinos pobres en oxígeno, como las llamadas “zonas de mínimo oxígeno” y las “zonas muertas”. Estas regiones oceánicas se caracterizan por tener concentraciones extremadamente bajas de oxígeno que impiden el desarrollo de organismos más grandes y complejos.

Las zonas de mínimo oxígeno están asociadas a fenómenos de surgencia, en los que las corrientes marinas ascendentes transportan aguas ricas en nutrientes a la superficie y con ello estimulan la producción primaria, es decir, la producción de materia orgánica por parte del fitoplancton. Parte de esa materia orgánica se hunde en el fondo marino y, en su camino, es degradada por microbios heterótrofos que consumen el oxígeno del medio, transformándolo en un ambiente hipóxico (con muy poco oxígeno) o incluso anóxico (carente de oxígeno).

En cambio, las zonas muertas se originan principalmente por la llegada masiva de nutrientes que se emplean como fertilizantes en la agricultura, es decir, es un problema ambiental ocasionado por la actividad antropogénica, con importantes repercusiones negativas en los ecosistemas marinos, como la proliferación de algas nocivas y la muerte de peces.

A continuación, exploraremos brevemente el fascinante mundo de los microbios que ciclan el nitrógeno y sus relevantes funciones en estos ambientes marinos escasos en oxígeno, sus im-

plicaciones en el clima global y cómo estudiamos en el laboratorio de Ecología Microbiana Acuática del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM estos seres invisibles pero poderosos héroes de nuestros océanos.

¿Por qué es trascendental el ciclo del nitrógeno marino?

El nitrógeno es un elemento químico esencial para todos los seres vivos porque forma parte de las proteínas y los ácidos nucleicos. Sin embargo, el nitrógeno es a menudo un nutriente limitante en los ambientes marinos, lo que significa que el crecimiento de los organismos está limitado por la baja cantidad de nitrógeno disponible en esos ecosistemas. De hecho, la forma de nitrógeno más abundante en nuestro planeta es la forma gaseosa, N_2 , que no puede ser utilizada por la mayoría de los microorganismos. La razón es que N_2 tiene dos átomos de nitrógeno unidos por un triple enlace ($N \equiv N$) y necesitan una enorme energía para romperlo. Afortunadamente, en la naturaleza está la solución: el ciclo del nitrógeno.

Este ciclo biogeoquímico es llevado a cabo por diferentes tipos de microbios que convierten el N_2 en formas biológicamente disponibles, como el amonio (NH_4^+) o el nitrato (NO_3^-). Estas formas de nitrógeno son utilizadas por el fitoplancton, que es la base de la red trófica marina. Por lo tanto, este ciclo es crucial para la supervivencia de los seres vivos.

Los microorganismos involucrados en el ciclo del nitrógeno en los sistemas marinos deficientes en oxígeno

La cantidad de oxígeno en el océano es un factor crítico que influye en los microorganismos involucrados en el ciclo del nitrógeno. En ambientes marinos limitados en oxígeno, como las zonas muertas que se producen en el golfo de México y las zonas de mínimo oxígeno del mar Arábigo y del Pacífico, en frente de México y de Chile, se crean unas condiciones ideales para los microorganismos anaerobios, es decir, aquellos que no requieren oxígeno para sobrevivir. En estos sistemas marinos destacan cuatro tipos principales de microorganismos con reacciones especializadas que les permiten ciclar diferentes compuestos nitrogenados (figura 1).

Los fijadores de nitrógeno, también llamados diazótrofos, convierten el N_2 en NH_4^+ , que es una forma de nitrógeno que otros organismos pueden usar. Ese proceso es esencial porque repone el nitrógeno en los sistemas marinos. La enzima encargada



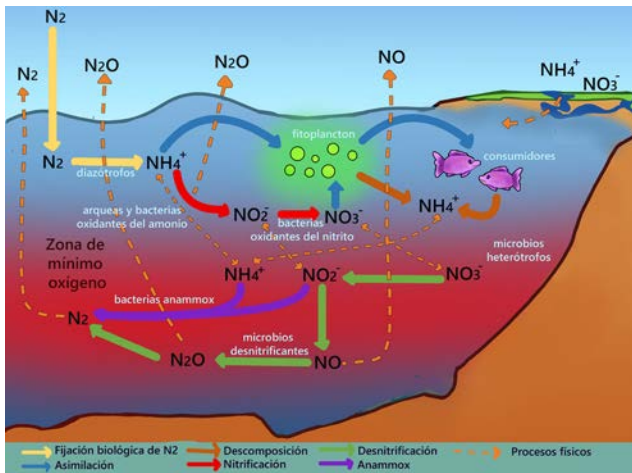


Figura 1. Principales procesos y microorganismos involucrados en el ciclo del nitrógeno en sistemas marinos deficientes en oxígeno. Imagen elaborada por S. Pajares Moreno.

de la fijación de nitrógeno se llama nitrogenasa, y se desactiva en presencia de oxígeno. Por lo tanto, los sistemas marinos limitados en oxígeno son ambientes ideales para este proceso, que es llevado a cabo principalmente por bacterias heterótrofas, o si hay disponibilidad de luz, por ciertas bacterias fotosintéticas del grupo de las cianobacterias, como *Trichodesmium*.

Los nitrificantes son un pequeño grupo de bacterias y arqueas autótrofas que convierten el NH_4^+ en nitrito (NO_2^-) y después en NO_3^- . La nitrificación es un proceso aerobio, pero algunos nitrificantes se han adaptado a vivir a bajas concentraciones de oxígeno. Esto le sucede a *Nitrosopumilus maritimus*, que es la arquea más abundante del océano y que oxida el NH_4^+ a NO_2^- , y a Nitrospina, que es la principal bacteria marina encargada de la oxidación de NO_2^- a NO_3^- .

Un grupo clave de microorganismos que prosperan en los ambientes marinos pobres en oxígeno son las bacterias anammox, que pertenecen al orden Planctomycetales. Estas bacterias realizan un proceso del ciclo del nitrógeno en ausencia de oxígeno que es único, denominado oxidación anaerobia del amonio (anammox), que les permite convertir NH_4^+ y NO_2^- en N_2 , que luego se libera a la atmósfera.

Los microorganismos desnitrificantes también son importantes en estos sistemas. Este es un grupo diverso de bacterias, arqueas e incluso hongos marinos que utilizan NO_3^- y NO_2^- como fuente de energía en ausencia de oxígeno y los convierte de regreso en N_2 , cerrando así el ciclo del nitrógeno. Este proceso ocurre en una serie de etapas secuenciales en las que el óxido nítrico (NO) y el óxido nitroso (N_2O) son productos intermedios que se liberan a la atmósfera.

El ciclo del nitrógeno marino y la regulación del clima

El ciclo del nitrógeno marino está íntimamente ligado al ciclo global del carbono y desempeña un papel primordial en la regulación del clima de la Tierra. Por ejemplo, una de las formas

en que el ciclo del nitrógeno influye en el clima es por su impacto en el almacenamiento (también llamado sumidero) de carbono oceánico. Este ciclo controla la cantidad de nutrientes nitrogenados disponibles y, por tanto, la productividad biológica en los sistemas marinos, lo cual se relaciona directamente con la cantidad de dióxido de carbono (CO_2) atmosférico fijado por el fitoplancton en su biomasa y la exportación de una porción de ese carbono orgánico desde la superficie al fondo marino en un proceso conocido como “bomba biológica de carbono”.

Además, en los sistemas marinos con escasez de oxígeno la desnitrificación y la anammox son los procesos dominantes del ciclo del nitrógeno. Los microorganismos involucrados en esos procesos convierten los compuestos nitrogenados en formas gaseosas como el N_2 , ocasionando abundantes pérdidas del nitrógeno disponible para los organismos marinos. Esto puede limitar la producción primaria y, en última instancia, reducir la cantidad de carbono que se almacena en esos ecosistemas.

Otra forma en la que el ciclo del nitrógeno influye en el clima es con la producción de gases de efecto invernadero, que son los que contribuyen al calentamiento global (véase “Conocer nuestro invernadero natural” en *Oikos*= 8, 2013). Por ejemplo, el N_2O es un potente gas de efecto invernadero que se produce durante la desnitrificación y la nitrificación. Por suerte, en los sistemas marinos pobres en oxígeno las bacterias anammox compiten con los microorganismos desnitrificantes por el NO_2^- y con las arqueas nitrificantes por el NH_4^+ , lo que reduce potencialmente la producción de N_2O que se libera a la atmósfera, que a su vez tiene un impacto positivo en el clima al contrarrestar el calentamiento global.

La relación de los microbios marinos que ciclan el nitrógeno con el clima del planeta es compleja, y las y los científicos seguimos trabajando para resolver muchas incógnitas que todavía hay y para comprender el alcance total de su impacto. Lo que ya está claro es que estos microorganismos desempeñan un papel vital en la regulación de la cantidad de nitrógeno marino y de los gases de efecto invernadero liberados a la atmósfera. Esto es especialmente importante en los sistemas pobres en oxígeno, en donde se pierde hasta 50% del nitrógeno marino. Además, estas zonas se están expandiendo a consecuencia del calentamiento global y la eutrofización y al hacerlo afectan las comunidades microbianas y, en consecuencia, el ciclo del nitrógeno (figura 2). Por ello, comprender el papel de los microbios marinos que ciclan el nitrógeno en la regulación del clima es fundamental para desarrollar estrategias eficaces de mitigación del cambio climático.

Eutrofización

La proliferación de fitoplancton por la llegada excesiva de nutrientes de N y P (procedentes principalmente de la actividad humana) a un sistema acuático ocasiona una disminución del oxígeno y de la calidad del agua.

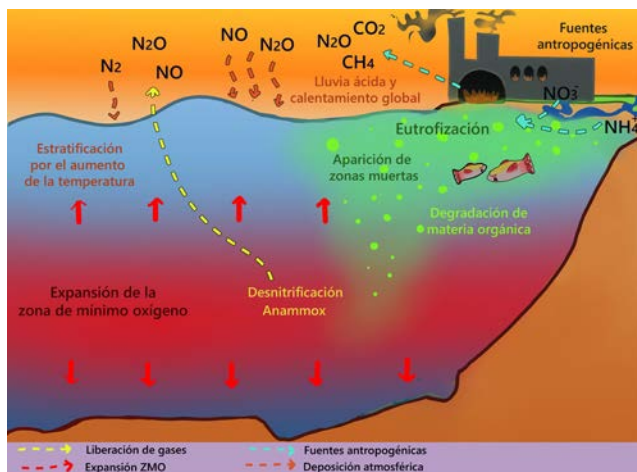


Figura 2. Efecto de las actividades antropogénicas en el ciclo del nitrógeno marino. Grandes cantidades de nitrógeno llegan a los ecosistemas marinos por escorrentía o deposición atmosférica, provocando la eutrofización, la formación de zonas muertas y la expansión de las zonas de mínimo oxígeno. Estas regiones son focos de anamox y desnitrificación, que provocan pérdidas de nitrógeno en forma de N_2 , N_2O y NO . La liberación de óxidos de nitrógeno por las actividades antropogénicas y en los ambientes marinos sin oxígeno provoca lluvia ácida y calentamiento global. A su vez, el calentamiento de los océanos provoca la estratificación del agua y la desoxigenación de los sistemas marinos. Imagen elaborada por S. Pajares Moreno.

¿Cómo estudiamos los microbios marinos que ciclan el nitrógeno?

El estudio de los microorganismos es una tarea complicada. Lo bueno es que actualmente ya tenemos una gran variedad de enfoques y herramientas para investigar su diversidad y actividad, en particular en los sistemas marinos. Las campañas oceanográficas, como las que realizamos en los buques “El Puma” y “Justo Sierra”, que pertenecen a nuestra universidad, son muy útiles para estudiar los microbios marinos. Esos buques cuentan con una serie de equipos especializados para el muestreo de agua o sedimento marino (figura 3).

Una vez que tenemos las muestras, hay distintas maneras de estudiar los microorganismos. Una puede ser aislando las células individuales para determinar características estructurales, genéticas, fisiológicas o metabólicas del microorganismo en cuestión. Por desgracia, el aislamiento de microbios no es adecuado para el estudio de sus relaciones ecológicas. Además, los microorganismos marinos suelen ser muy difíciles de cultivar y, por lo tanto, no se pueden identificar utilizando técnicas tradicionales.

Por ello, el enfoque actual más utilizado para el estudio de esos microorganismos es mediante técnicas moleculares. Estas herramientas nos permiten identificar y clasificar los organismos según su ADN, así como detectar y cuantificar genes. Por ejemplo, los científicos pueden utilizar la reacción en cadena de la polimerasa (PCR, por sus siglas en inglés) para amplificar pequeñas cantidades de ADN de los microbios presentes en una muestra de agua. Luego se puede secuenciar el ADN amplificado y compararlo con bases de datos de secuencias de ADN conocidas para identificar las

distintas especies de microorganismos presentes y los genes que codifican las enzimas involucradas en el ciclo del nitrógeno, como la nitrogenasa.

Otras técnicas moleculares, como la PCR cuantitativa, también nos permiten medir la cantidad de microorganismos y genes específicos en una muestra. Adicionalmente, los científicos usamos a la metagenómica (véase *De la genómica a la sostenibilidad: el caso de México*, Oikos= 17, 2017), que consiste en secuenciar todo el ADN en una muestra de agua, lo que nos permite identificar todos los microorganismos presentes, así como sus genes y rutas metabólicas, y por tanto conocer sus funciones en el ecosistema marino.

Para medir la actividad microbiana en sistemas marinos pobres en oxígeno actualmente se utilizan técnicas como los radio-trazadores, para seguir la trayectoria de los nutrientes y los gases producidos por los microorganismos, o la incubación de muestras de agua con diferentes sustratos, para determinar las tasas de ciertos procesos como la desnitrificación. En esta última técnica también se pueden emplear isótopos estables, como el ^{15}N , que se incorpora en los metabolitos producidos por los microbios presentes en la muestra.

Las nuevas tecnologías –como los sensores y los sistemas de monitoreo en tiempo real– están siendo cada vez más utilizadas para el estudio de los microorganismos marinos. Los sensores, como el CTD (acrónimo en inglés de conductividad, temperatura y profundidad), pueden medir propiedades físicas como la temperatura, la salinidad y la densidad a lo largo de la columna de agua, lo que nos puede dar pistas sobre la actividad microbiana en ese lugar. Además, se están desarrollando sistemas de monitoreo

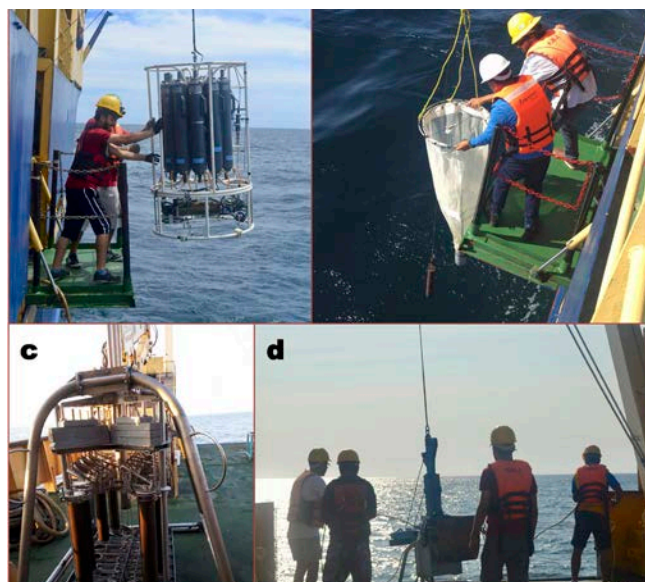


Figura 3. Equipos usados en los buques oceanográficos de la UNAM para el muestreo de microorganismos marinos: a) Roseta con un sensor CTD y botellas oceanográficas para el muestreo de agua, b) Red para fitoplancton y zooplancton, c) Multinucleador y d) Draga para el muestreo de sedimentos. Fotografías de S. Pajares Moreno.

en tiempo real que permiten medir la actividad microbiana de forma constante y en diferentes zonas del océano.

Por último, también se utilizan modelos matemáticos para simular el comportamiento de los microorganismos que ciclan el nitrógeno en sistemas marinos limitados en oxígeno y así prever cómo pueden influir estas comunidades microbianas en el clima global.

El futuro: implicaciones para la mitigación del cambio climático

Gracias a las recientes tecnologías, hoy sabemos que los microorganismos desempeñan un papel crucial en el ciclo del nitrógeno en los sistemas marinos limitados en oxígeno. La desnitrificación es uno de los procesos clave del ciclo del nitrógeno en estos sistemas, ya que puede limitar la producción primaria, producir gases de efecto invernadero —como el N_2O y el CO_2 — y reducir la cantidad de carbono que se almacena en los ecosistemas marinos, lo que tiene repercusiones en el clima global.

Por ello es importante seguir investigando y monitoreando los microorganismos en estos ambientes marinos, para así comprender mejor su papel en el ciclo del nitrógeno y su impacto en la salud del planeta (figura 4).

Además, es fundamental tomar medidas de conservación y mitigación para prevenir la aparición y expansión de las zonas muertas en los sistemas marinos. Por ejemplo, la implementación de prácticas agrícolas e industriales más sostenibles para disminuir la cantidad de nutrientes que llegan a los océanos es una de las acciones que pueden contribuir a proteger los ecosistemas marinos y preservar el clima global.

Silvia Pajares la Dra. Pajares es investigadora del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM), donde es responsable del Laboratorio de Ecología Microbiana Acuática. Su línea de investigación se centra en la ecología de las comunidades microbianas que controlan el ciclo del nitrógeno en sistemas marinos y su relación con el cambio climático. Para mayor información: https://www.icmyl.unam.mx/quienes_somos/personal_academico/pajares-moreno-silvia
email: spajares@cmarl.unam.mx



Figura 4. Puesta de sol desde el buque oceanográfico “El Puma” (UNAM).
Fotografía de S. Pajares Moreno.

Para saber más

- Falkowski, P.G. 2002. The ocean's invisible forest. *Scientific American* 287: 54-61. doi: [10.1038/scientificamerican0802-54](https://doi.org/10.1038/scientificamerican0802-54)
- Lam, P. y Kuypers, M.M.M. 2011. Microbial nitrogen cycling processes in oxygen minimum zones. *Annual Review of Marine Science* 23: 317-345. doi: [10.1146/annurev-marine-120709-142814](https://doi.org/10.1146/annurev-marine-120709-142814)
- Pajares, S. 2016. La cascada del nitrógeno ocasionada por actividades humanas. *Oikos*= 16: 14-17.
- Pajares, S. y Ramos, R. 2019. Processes and microorganisms involved in the marine nitrogen cycle: Knowledge and gaps. *Frontiers in Marine Science* 6: 739. doi: [10.3389/fmars.2019.00739](https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00739).
- Pajares, S. y Souza, V. 2013. “¿Microorganismos para controlar el calentamiento global?” *Oikos*= 8: 19-21.



El Marco de Kunming-Montreal para la conservación de la biodiversidad: más buenos deseos

Jorge Soberón Mainero

Make no mistake: this is an historic result for nature. The Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework provides a long-needed international blueprint to guide our collective turnaround of nature's fortunes within this crucial decade.

No se equivoquen: este es un resultado histórico para la naturaleza. El Marco mundial Kunming-Montreal de la diversidad biológica es un lineamiento internacional que desde hace mucho se necesitaba para virar de manera colectiva el destino de la naturaleza en esta crucial década.

The Nature Conservancy

Me pregunto si esto será cierto. El 18 de diciembre de 2022, en Montreal, los países parte del Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB) se pusieron de acuerdo en un nuevo documento titulado Kunming-Montreal Global biodiversity framework (CDB/COP/15/L.25 disponible en línea en: (<https://www.cbd.int>)). Este documento, un borrador sometido por la presidente del CDB, es un marco para la conservación de la biodiversidad. Sugiero que los interesados vean este documento personalmente y no utilicen fuentes secundarias. Es muy interesante apreciar la formalidad y prolijidad del lenguaje usado en las Naciones Unidas.

Me gustaría expresar aquí algunas razones por las que dudo mucho que este documento vaya a ser más efectivo que otros anteriores, como las Metas de Aichi para la Diversidad Biológica (<https://www.cbd.int/sp/targets/>), propuestas para la década de 2011 a 2020. La decisión preliminar adoptada en ese momento como un marco mundial de biodiversidad incluye cuatro metas: la primera, relacionada con detener la tasa de extinción; la segunda, con alcanzar el desarrollo sustentable; la tercera (irrelevante desde un punto de vista de manejo de la biodiversidad), que existan beneficios económicos derivados de los llamados “recursos genéticos”; y la última, que se aseguren los recursos financieros para lograr todo lo anterior (donativos, contribuciones gubernamentales y apoyos del sector privado).

Las primeras dos metas, que son las principales, ignoran completamente las causas profundas de la pérdida de biodiversidad. Dichas metas se enfocan totalmente en problemas, digamos, inmediatos, como las altas tasas de extinción, la pérdida de ecosistemas naturales y el deterioro de la diversidad genética, pero las causas profundas son otras.

Algunas de esas causas profundas son el crecimiento poblacional regional a tasas incompatibles con la sustentabilidad; la incompatibilidad de los regímenes “modernos” (capitalistas) de



Convention on
Biological Diversity

tenencia de la tierra respecto a los tradicionales, de propiedad comunitaria; y la falta de “mercados” para los incontables servicios que la biodiversidad provee (esto significa que, por ejemplo, si una selva produce oxígeno muy valioso, sus habitantes no son recompensados).

En particular considero importante la falta de coordinación —de hecho la franca contradicción— entre instituciones nacionales como los ministerios de agricultura de todo el mundo —que subsidian con financiamientos millonarios los avances de las fronteras agrícolas, apoyan la introducción de especies invasoras y la extracción insustentable de agua de riego, y respaldan el descontrolado uso de herbicidas y fertilizantes químicos— y los ministerios del medio ambiente, que luchan —débilmente— contra todo esto.

Me parece que a menos de que se ataquen esas causas profundas, no pasa de ser un buen deseo proponerse como meta: *Human induced extinction of known threatened species is halted, and, by 2050, extinction rate and risk of all species are reduced tenfold and the abundance of native wild species is increased to healthy and resilient levels* (meta A del borrador del CDB/COP/15/L.25). En primer lugar, no pasa de ser un buen deseo porque los procesos económicos y sociales que causan la extinción y degradación de los ecosistemas siguen siendo subsidiados. Las contracorrientes, que sin duda existen, tienen migajas presupuestales.

En segundo lugar, este acuerdo *Marco...* no pasa de ser un buen deseo porque, como es costumbre en el CDB, no plantea decisiones vinculantes (obligatorias) sino recomendaciones. En efecto, el artículo 13 del borrador de decisión contiene las siguientes palabras: *Actions to reach these targets* (esto es, las cuatro metas enunciadas arriba; nota mía) *should be implemented consistently and in harmony with the Convention on Biological Diversity and its Protocols and other relevant international obligations, taking into account national circumstances, priorities and socioeconomic conditions*. “Las medidas tendientes a alcanzar estas metas deberán implementarse en forma coherente y en armonía con el Convenio sobre la Diversidad Biológica y sus protocolos, así como con otras obligaciones internacionales pertinentes, teniendo en cuenta las circunstancias, prioridades y condiciones socioeconómicas nacionales (subrayado mío).”

En otras palabras, si las circunstancias nacionales no lo permiten, no se obliga a ninguna nación a alcanzar las metas. ¿Y quién decide si las circunstancias nacionales son inapropiadas?: el gobierno de cada nación.

Como en el propio *Convenio de Diversidad Biológica*, en el acuerdo *Marco...* no hay mapas con prioridades, no hay tablas, no hay objetivos nacionales cuantitativos y detallados, no hay listas de especies (de hecho, durante las negociaciones del CDB de 2022, muchos países del mundo en desarrollo se opusieron a que se utilizaran las listas o mapas ya existentes) y no hay obligatoriedad de ningún tipo.

El acuerdo incluye 23 metas u objetivos, engañosamente cuantitativos, como la meta 2: “Garantizar que para 2030 al menos 30% de las zonas de ecosistemas terrestres, de aguas continentales y costeros y marinos degradados estén siendo objeto de una restauración efectiva, con el fin de mejorar la biodiversidad y las funciones y los servicios de los ecosistemas y la integridad y conectividad ecológicas”. Restaurar ecosistemas es más caro que conservarlos, y hay países casi completamente degradados (como es el caso de Haití), mientras que otros están aún razonablemente conservados (como por ejemplo Belice). Los ecosistemas boreales están mucho menos degradados que los de zonas templadas y tropicales. Entonces, ¿ese 30% es del mundo o de cada país?, y ¿qué significa *effective restoration*? Restaurar un bosque de niebla (por ejemplo, los de la Huasteca mexicana) cuando el clima está cambiando puede ser simplemente imposible.

En mi opinión, la mayor parte de estos 23 objetivos son, si no engañosos, al menos irrelevantes. Muy políticamente correctos algunos, eso sí.

Me pregunto entonces ¿por qué razón deberíamos esperar a que las cosas sean ahora distintas? Como este documento ya se firmó en Montreal, ¿los países firmantes se comprometen a cesar la extracción de agua de acuíferos relevantes como los de Cuatro Ciénegas?, ¿a terminar finalmente la pesca incidental de ejemplares en zonas de protección como la de la vaquita marina (*Phocoena sinus*), o detener el tráfico con vejigas de totoaba (*Totoaba macdonaldi*)? ¿Se va a detener la deforestación como la que ocurre en la península de Yucatán? Si así fuera, seguramente no sería porque

en Montreal se haya firmado un documento no vinculante, sino porque la ciudadanía mexicana (y de cada país del mundo) haya hecho su tarea localmente y haya logrado que sus autoridades locales o nacionales tomen las medidas necesarias.

Las razones por las que se pierde la biodiversidad en general son locales o nacionales, y cambiarán cuando los ciudadanos de un país, o los habitantes de una comarca, decidan hacer las cosas de manera distinta.

Entonces, ¿son inútiles las organizaciones como la CDB? ¡No!, ¡son muy importantes!: por ejemplo, a finales de 2022 la causa de la biodiversidad ganó estatura y visibilidad gracias a este acuerdo preliminar y es probable que aumenten los fondos mundiales para proteger la biodiversidad. Recordemos que México, junto con Brasil y China, es de los países más beneficiados con fondos internacionales para el medio ambiente, en el orden de cientos de millones de dólares.

Las ideas que comparto son simplemente para desestimular un optimismo equivocado. En México, y en todo el mundo, los problemas ambientales se resuelven cuando la ciudadanía local, apoyada por sus instituciones de ciencia, exigen los cambios locales adecuados.

“Por eso la ciencia es fundamental.

¿En Montreal firmaron otro acuerdo? Qué bueno”.

Ahora sigamos en nuestros gobiernos municipales, nuestra cámara de diputados y en SEMARNAT con las tareas que tenemos respecto a nuestras especies (listas, mapas y datos duros), nuestros ecosistemas (mapas y monitoreo satelital), nuestros problemas, nuestros objetivos. ¿Y nuestras soluciones?

Jorge Soberón Mainero es profesor distinguido del Departamento de Ecología y Biología Evolutiva de la Universidad de Kansas, Estados Unidos, y actualmente director del KU Biodiversity Institute and Natural History Museum de la misma Universidad. Doctor en Ciencias del Imperial College de la Universidad de Londres. Fue investigador del Instituto de Ecología de la UNAM hasta 2005. Es especialista en Matemáticas, Ecología de Poblaciones, Bioestadística, Biología Computacional y patrones espaciales sobre la biodiversidad. Fue Presidente ejecutivo de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) de 1992-2005.

Para saber más

- Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). 2022. Marco mundial Kunming-Montreal de la diversidad biológica. Proyecto de decisión presentado por la Presidencia. <https://shorturl.at/u6F7j>
- Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB). 2011. Metas de Aichi para la Diversidad Biológica. <https://www.cbd.int/sp/targets/>

Los misterios de un lugar legendario y mítico: Los valles de Tehuacán y Cuicatlán

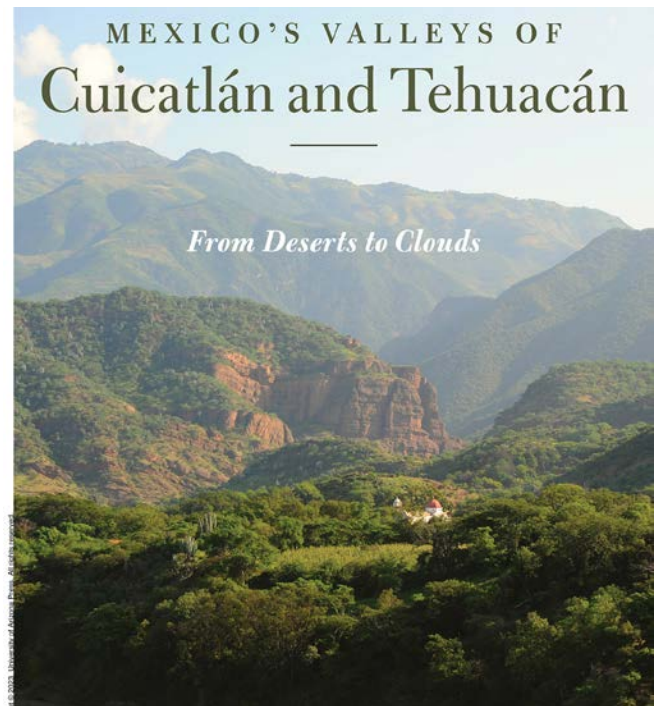
Luis E. Eguiarte y Clementina Equihua Zamora

Para las y los biólogos de México, la región de Tehuacán y Cuicatlán es un lugar mítico y misterioso. Desde la carretera cuando vamos a la ciudad de Oaxaca nos impresionan sus bosques de cactus columnares, tan densos, y cómo se entremezclan con otras plantas únicas y extravagantes que van cambiando a lo largo del camino. ¡Y no es sólo cómo se “ve de lejos” la vegetación! Lo confirmas cuando bajas del coche, porque no solo te encuentras con muchas plantas morfológicamente rarísimas, como son las patas de elefante (*Beucarnea gracilis*, *B. purpusi*, *B. stricta*), o los cirios u ocotillos (*Fouquieria formosa* y *F. purpusii*), o las 18 o más especies de cactáceas columnares. Cuando miras con cuidado estos cactus, distingues que algunos se yerguen verticalmente pero otros se ramifican con diferentes patrones.

Los sorprendentes valles de Cuicatlán y Tehuacán no sólo alojan muchos grupos de plantas de formas extrañas, sino que en su biodiversidad es riquísima y única en nuestro planeta. Efectivamente, como otros lugares míticos para las y los biólogos —como lo es la región de Cuatro Ciénegas— en los valles de Tehuacán y Cuicatlán y zonas cercanas (denominada oficialmente Reserva de la Biosfera Tehuacán-Cuicatlán) la diversidad biológica es altísima. Una consulta en el portal Enciclovida de CONABIO arroja que en total ahí están documentadas 5,124 especies de plantas y animales (revisado el 21 de junio 2024, con la palabra de búsqueda: Tehuacán-Cuicatlán, Reservas de la biosfera). De acuerdo con Yetman y Búrquez (2023) en los valles de Cuicatlán y Tehuacán viven más de 2,600 de especies de angiospermas, y son muy altos los índices de endemismos. Para darnos una idea, ellos mencionan que 14% de sus plantas con flores son endémicas.

Las preguntas básicas que nos surgen cómo biólogos modernos son ¿Por qué hay estos lugares con biodiversidades tan altas? Y en particular ¿Por qué hay en México varios de estos puntos con altísimas biodiversidades?

Yetman y Búrquez, en *Mexico's Valleys of Cuicatlán and Tehuacán. From deserts to clouds* (2003) describen la notable biodiversidad de esos valles, y al mismo tiempo, discuten las características climáticas, geológica, geográficas e históricas de los valles, que seguramente debería ayudarnos a explicar esta biodiversidad. De igual manera, Yetman y Búrquez nos iluminan sobre la gran diversidad cultural de la región, dedicando dos capítulos completos a los grupos humanos (definidos por sus lenguas) que habitaron y habitan esta región. Nos platican de



lo que se sabe de la historia profunda de la gente en los valles y responden preguntas como: ¿Cuándo llegaron y como se desarrollaron estas culturas?, ¿Qué evidencias arqueológicas se han encontrado?, y sobre todo desde la perspectiva biológica ¿Cómo interactuaron con el ecosistema?

Las culturas de los valles de Cuicatlán y Tehuacán no sólo son muy diversas, sino que seguramente las poblaciones humanas han sido muy grandes, dinámicas e importantes para la ecología de la zona. Además, posiblemente diferentes procesos de domesticación y manejo temprano de las plantas de México sucedieron en esta región hiperdiversa. De hecho, mucho del trabajo arqueológico que se desarrolló en la década de 1960 en esta región por el grupo de investigadores de Estados Unidos liderado por Richard MacNeish buscaba entender estos procesos de domesticación.

La elevada biodiversidad de los valles de Tehuacán y Cuicatlán se debe, cuando menos en parte, a su heterogeneidad

geográfica, que genera una gran diversidad de climas, de suelos y microambientes a escalas muy cercanas. También debe de ayudar a esta hiperdiversidad cierta estabilidad climática y ambiental a lo largo de mucho tiempo (aspecto que no se explora realmente en el libro), lo que posiblemente ha permitido que no se extingan diversas especies de plantas.

Otra pregunta básica que las y los biólogos modernos nos hacemos sobre la región es ¿Cómo es posible que la región haya mantenido tanta biodiversidad, si en los últimos 10 mil años (cuando menos 6 mil, según Yetman y Búrquez, página 43) ha habido grandes poblaciones humanas? Sobre todo si consideramos que en muchas otras regiones del mundo, en donde ha habido elevadas presiones demográficas, en particular en el Viejo Mundo, se ha perdido mucha de la biodiversidad. Esta pérdida de biodiversidad se demuestra en varios sitios del mundo en donde actualmente es imposible encontrar a los parientes silvestres a partir de los cuales se domesticaron las numerosas plantas que consumimos hoy en día. En otras palabras, ya se extinguieron esos parientes silvestres. Consideramos que otro de los grandes enigmas de la región de Tehuacán-Cuicatlán es ¿Cómo pudieron coexistir por tanto tiempo grandes poblaciones humanas junto con esta diversidad biológica tan elevada? El amplio libro de Yetman y Búrquez (2023) no responde esta interrogante, pero se puede uno imaginar que las prácticas de cultivo y manejo ambiental de los grupos humanos de dichos valles han ayudado a mantener esta biodiversidad, aunque en algunos casos ha sido muy destructivas (como lo demuestra la alta deforestación y erosión por sobrepastoreo reciente en ciertas áreas).

La obra de Yetman y Búrquez (2023) está organizado en ocho capítulos. El Capítulo 7 es el más extenso (ocupando 120 páginas) y es el corazón de la obra, cuando menos para nosotros los biólogos (y en particular los botánicos), ya que es donde se describe su maravillosa y misteriosa flora junto con los ecosistemas. Los otros capítulos describen otros aspectos de lo que tradicionalmente llamamos la “historia natural”, es decir se aborda el clima, la hidrología y la geología de la zona, también se analizan a los grupos humanos que han habitado y todavía habitan la región.

Una característica especialmente atractiva de este libro es que se incluyen muchísimas fotos, muy buenas y a color, así como mapas originales y atractivos (aunque a veces difíciles de entender porque tienen mucha información), y diagramas que ayudan a apreciar algunos aspectos geográficos de los valles de Tehuacán y Cuicatlán.

Un recorrido por Mexico's Valleys of Cuicatlán and Tehuacán. From deserts to clouds

Al introducir su libro, Yetman y Búrquez (2023) nos platican como conocieron la región y porque decidieron escribirlo. Ambos aceptan que en realidad su experiencia en la región es limitada, y que lo que conocen bien a lo largo de toda su vida son los desiertos de Sonora y Arizona. David Yetman es un científico de las ciencias sociales que trabaja en Tucson, en el Southwest

Center de la Universidad de Arizona. David es famoso en Estados Unidos porque ha producido una serie de documentales para la PBS (la televisión pública y educativa de EUA). David también ha trabajado mucho con cactus del desierto de Sonora y su uso por la gente y en diversos estudios sobre los grupos humanos que viven en el desierto. David Yetman y Alberto Búrquez son coautores (junto con otros investigadores) del libro *The saguaro cactus: a natural history* (que reseñamos aquí en *Oikos*= 26: 14-17, 2023). David narra que la primera vez que pasó por Tehuacán fue en 1969, camino a la ciudad de Oaxaca, pero como confiesa, no prestó mucha atención. No fue hasta el 2000 que empezó a familiarizarse y enamorarse de la región. En el 2003 comenzó a explorar la región más seriamente con Alberto Búrquez.

Alberto Búrquez es uno de los grandes naturalistas de México. Es investigador de nuestro Instituto (I. Ecología, UNAM) en su sede de Sonora, y ha trabajado en muchas regiones y ecosistemas del país, pero su principal interés científico ha sido la ecología del desierto de Sonora, donde creció, reside y hace su investigación desde principios los años 1990. Alberto narra que la primera vez que fue a la región de Tehuacán fue en 1974, cuando cursaba una materia de la licenciatura en biología en la UNAM, y posteriormente en otros viajes de trabajo, cursos de campo, etc. A lo largo de estas esas se fue impresionando con la belleza, diversidad y rareza de estos valles.

El Capítulo 1 es una introducción a México que es más bien útil para los lectores que no conocen el país. Describen con cuidado el “*Trans-Mexican Volcanic Belt*”, que en nuestras clases de la primaria y secundaria llamábamos simplemente el “Eje Volcánico”. Además, nos platican sobre la geografía y geología general del centro de México, junto con sus culturas ancestrales, y mencionan la ruta comercial que salía del norte y centro del México actual hacia el sur y Centroamérica, pasando por Cholula, descendiendo en elevación al valle de Tehuacán y de allí al de Cuicatlán, volviendo a subir a la ciudad de Oaxaca, para luego ir a las tierras bajas donde vivían los Mayas de Chiapas y Centro América.

Los patrones mundiales de circulación de vientos —que explican las zonas áridas de muchas partes del mundo— se describen en el Capítulo 2. Esta sección inicia destacando que la región de Tehuacán-Cuicatlán esta más al sur de las áreas entre los 30 y 35 grados Norte, que son las latitudes en donde se encuentran los desiertos en Norte América y como nos explican en las clases de Ecología introductoria de las escuelas de Biología. Aprendimos que los principales desiertos del norte de nuestro continente —como los de Sonora, Baja California y el desierto Chihuahuense— son el resultado de este patrón de circulación de vientos. Pero para explicar la diversidad biológica actual de la zona de Tehuacán-Cuicatlán, obviamente necesitamos conocer los climas en el pasado. Brevemente, Yetman y Búrquez nos ayudan a conocerlos, explicando que en la región los climas han sido estables desde hace unos 15 millones de años, aunque tuvieron un periodo más húmedo en el Pleistoceno, entre hace 1.8 millones y 12 mil años.

La geología de los Valles de Cuicatlán y Tehuacán se trata en el Capítulo 3. Los valles y zonas cercanas son en realidad una cuenca, una depresión, de 130 kilómetros de largo por 5 a 15 de ancho. Los ríos ancestrales que bajaban de las sierras formaron lagos, que se comenzaron a llenar en el Cenozoico, hace tal vez más de 60 millones de años. En el Cuaternario, en los últimos 2.5 millones de años, estos lagos ancestrales se drenaron en el río Papaloapan. Asimismo, nos platican de la interacción y choque de las placas de Cocos con las de Norte América y la del Caribe. Estos fenómenos formaron a las montañas de la región en la llamada “orogenia Laramide”, que fue la que también dio origen a las montañas Rocallosas en EUA y Canadá, hace 70 a 40 millones de años. También nos explican cómo la subducción de la Placa de Cocos dio origen al Eje Volcánico y que en general que la dinámica geológica fue muy complicada y apenas se está entendiendo mejor.

En el Capítulo 4 se describen detalladamente los valles en tiempos precolombinos. Revisan brevemente al imperio Mexica y nos hablan de sus emperadores y conquistas en la parte final de las etapas prehispánicas. En este capítulo mencionan el comercio prehispánico, en donde destacan las frutas de consumo humano que actualmente (y seguramente en el pasado prehispánico) crecen en la región tropical de Cuicatlán. Aspectos interesantes son la posible relevancia de la región como fuente de víctimas de los Mexicas para llevar a cabo sus rituales, que incluían sacrificios humanos, y cómo usaron los valles para moverse hacia el sur y continuar sus conquistas.

El resto del Capítulo 4 está organizado cronológicamente. Comienza con el periodo Arcaico, hace unos 2400 años, con los posibles orígenes de la agricultura, abordando detalles de la cultura Olmeca, principalmente de Veracruz, quienes usaban la mandioca, o yuca, *Manihot esculenta* (Euphorbiaceae), así como sobre los asentamientos tempranos en Tehuacán cuyos habitantes desarrollaron la cerámica. El capítulo también menciona a los Mixtecos, que, aunque son un grupo muy antiguo, tal vez precediendo por 2 mil años a Tenochtitlán, no se apoderaron de Monte Albán sino hasta ca. de 600-700 DC, y dicen que, aunque no se encuentran artefactos Mixtecos en la región de La Cañada, si se detectan en sitios más al norte. Asimismo, explican que a mediados del siglo XV, los Mixtecos, aunque en conflicto con Tenochtitlán, controlaban la mayor parte de los valles centrales de Oaxaca, en una compleja dinámica con grupos Zapotecas que aún dominaban diferentes regiones. Aquí discuten por primera vez la fortaleza Zapoteca de Cerro Quiotepec, que fue el punto más norteño dominado por los Zapotecas y que se ubica en donde se junta el Valle de Tehuacán con La Cañada. La fortaleza fue construida alrededor del año 200 DC y creen que funcionaba como un puesto militar y de control migratorio y del comercio. También por primera vez platican de la impresionante presa Purrón, a unos 30 km al norte de Quiotepec, que debe haber sido una zona muy fértil y productiva gracias a un manejo eficiente del agua. Consideran que la fertilidad y productividad de la zona seguramente fue muy importante para el comercio.

Posteriormente discuten sobre los diferentes conflictos y guerras que posiblemente surgieron por el control del agua de los ríos en la zona.

En el mismo Capítulo 4 describen el extenso proyecto que coordinó desde principios de 1960 Richard S. MacNeish en Tehuacán para analizar de manera multidisciplinaria el desarrollo de la agricultura, especialmente del maíz. En concreto revisan las exploraciones de la cueva cerca de Coxcatlán, donde se documentó la presencia de maíz que inicialmente consideraron que tenía 7,600 años de antigüedad. Actualmente se sabe que ese registro es más reciente. Richard MacNeish y su equipo demostraron la ocupación del valle por grupos humanos por más de 10 mil años y sus descubrimientos documentaron el papel del valle del Tehuacán en la domesticación temprana del maíz. Estudios actuales sugieren que el maíz no se domesticó en Tehuacán, sino que más bien las condiciones climáticas y físicas de las cuevas de la región ayudaron a mantener el registro arqueológico del maíz en la zona. Sin embargo, debemos mencionar que otros trabajos han demostrado la importancia de la región en la domesticación del chile y de la calabaza.

En el Capítulo 5, David Yetman y Alberto Búrquez abordan a los grupos humanos que se viven actualmente en el valle, definiéndolos por sus idiomas. Actualmente se hablan en la zona ocho idiomas nativos (o sea, además de español). Todos, excepto el náhuatl, están relacionados con lo que llaman la “rama este” de la familia de lenguas otomangues (relacionadas por ejemplo con el otomí o hñahñu, y el mazahua). Explican que los lenguajes otomangues son tonales, como el mandarín y el bantú, por eso los españoles no los pudieron dominar, en contraste con el náhuatl, que es no-tonal, como el castellano y las lenguas romances.

Tres de estos idiomas, aunque comunes en otras zonas, se hablan poco en la región. Además, todos los que hablan ixcatepeco viven en un solo pueblo de los valles, específicamente en Santa María Ixcatlán, y la mayoría de los que aún habla chocho viven en los alrededores de su tierra nativa, Coixtlahuaca. También mencionan al zapoteco, que ya no se habla en la zona.

Concluyen el capítulo meditando sobre su mapa de la distribución aproximada de estos lenguaje y grupos humanos en la región, que es más bien como una amiba en movimiento fruto de complejos patrones migratorios, conquistas y guerras, y otros cambios poblacionales, pero con un pobre registro arqueológico, aunque tal vez los Mexicas y posiblemente luego los españoles, introdujeron cierta estabilidad territorial

En el Capítulo 6 retoman con entusiasmo a la arqueología de la región, revisando de nuevo el proyecto del equipo de R.S. MacNeish en Tehuacán que inició en los años 60 del siglo pasado. Aunque el trabajo de MacNeish se propone como pionero, hubo antes otros estudios por mexicanos que los mismos Yetman y Búrquez mencionan escuetamente y de manera dispersa en diferentes partes del libro. Del proyecto de MacNeish, Yetman y Búrquez indican, que aunque su objetivo era analizar la historia antigua de la agricultura en la región, detectaron diversos restos

de civilizaciones en el área. Por ejemplo, para 1972, MacNeish y colegas habían identificado 456 sitios arqueológicos en el Valle de Tehuacán y entre 1971 y 1972, el arqueólogo Edward Sisson reportó otros 63 sitios en Coxcatlán y sus alrededores. Pocos vestigios arqueológicos sobreviven en La Cañada, tal vez debido a que hay poca área adecuada para construir pueblos y grandes estructuras, aunque mencionan un estudio del 1997 que identificó 93 sitios.

El capítulo detalla cuatro sitios principales, nosotros tristemente no conocemos ninguno. El primero es el Cerro Cuthá, al noroeste de la región del valle de Tehuacán en el valle de Zapotitlán Salinas, en la zona Popoloca. Cuthá significa en Popoloca “El cerro de la máscara”. El cerro Cuthá emerge directamente al este del famoso Jardín Botánico Helia Bravo. Los autores nos comentan que una caminata de “apenas tres horas” (en otra parte confiesan que son extenuantes) te lleva al lugar, después de subir una pendiente de 275 m desde la base. No muchos estamos dispuestos a una caminata así, a menos que sea muy interesante y el camino bonito. Explican que el mayor desarrollo de la región de Cuthá fue en el Clásico Tardío, entre 650 y 950 de nuestra era, con gran énfasis en los enterramientos. Por ejemplo, describen con cuidado una tumba cruciforme, con dinteles hechos de columnas prismáticas de basalto que se trajeron de un sitio a 3 km, que ilustran con una fotografía (p. 168). Finalmente, el cerro Cuthá fue capturado por los Mexicas en tiempos de Moctezuma I y posteriormente, Hernán Cortés obligó a los residentes a moverse a Zapotitlán, y los primeros misioneros en esta zona fueron Franciscanos.

La monumental Presa Purrón ya había sido descrita antes en el libro, pero aquí hablan de ella con más detalle y admiración. Esta presa está a 40 km al sureste del Cerro Cuthá y según Yetman y Búrquez es la estructura hidráulica (conocida) más importante de Mesoamérica (pp. 172-180). Pero también alertan que si se espera algo dramáticamente llamativo, se decepcionaran, porque no hay ni letreros en los caminos, la terracería es de difícil acceso y nadie vive actualmente en la zona. Añaden que está densamente cubierta por plantas espinosas, de las que se favorecen cuando hay sobre pastoreo. Dicen que una inspección cuidadosa revela la existencia de una superestructura formada por una miríada de piedras cotadas y ladrillos para formar contrafuertes y murallas. La estructura cruza el arroyo Lencho Diego, y en su desarrollo completo midió unos 24 m de alto, por unos 106 de ancho y 400 de largo. Por su narración, los autores nos hacen apreciar que la construcción de esa presa no sólo debió implicar un esfuerzo monumental, de muchos años, para su construcción, sino que también para darle mantenimiento. Eventualmente la presa falló, pero no por ingeniería defectuosa, sino seguramente por los sedimentos que se acumularon durante el par de milenios que sirvió para manejar el agua en la región y mantener la agricultura. Por ejemplo, uno de sus canales más importante actualmente llamado de Santa María, se extiende por 1.4 km hacia el margen norte de la presa. Esta obra hidráulica fue expandida cuando menos en tres ocasiones, la última antes de 300 DC y gradualmente

se fue abandonando, al mismo tiempo que los Zapotecos dejaron el Cerro Quiotepec, más al sur. La presa, en su desarrollo mayor, debe haber permitido irrigar unas 675 hectáreas y mantener una extensa población humana. Aunque Yetman y Búrquez destacan la importancia y el tamaño de la presa, concluyen que se sabe poco de sus constructores. En resumen, a pesar de su importancia y tamaño, tanto el Cerro Cuthá como la presa Purrón, no nos suenan en este momento muy atractivos para visitarlos.

Unos 25 kilómetros al sur de la presa Purrón está el cerro Quiotepec, una fortaleza Zapoteca que de acuerdo con los autores recuerda a Monte Albán por su posición y majestuosidad. A este sitio tampoco llegan los vehículos motorizados, así que hay que conseguir permisos locales para ir a pie desde el pueblo de Quiotepec por unos dos kilómetros. Las estructuras de esta fortaleza cubren un área de unas 45 hectáreas, aunque solo están modestamente excavadas y menos restauradas. Aun así, se han descubierto dos plazas grandes, una con una gran plataforma, y un complejo habitacional con tumbas y un juego de pelota. Los arqueólogos han estimado que ahí vivieron unas 2 mil personas entre 300 AC a 300 DC, aunque tenían que subir a mano el agua desde el río. También mencionan, de la misma región, a las pirámides de Tecomovaca, que dicen, no han sido exploradas recientemente.

El Capítulo 6 termina con la descripción del sitio de Tehuacán Viejo o la Mesa (a partir de la p. 195), un lugar que se ubica a unos 90 kilómetros al Noroeste del cerro Quiotepec y mil metros más elevado, quedando cerca (8 km) del centro de la actual ciudad de Tehuacán. Relatan que el sitio sólo ha sido modestamente estudiado, alrededor de un 10%. Las exploraciones por el INAH iniciaron hasta 1993 y es el que administra actualmente unas 200 ha. La ocupación humana del sitio data del Preclásico Tardío, 500 a 150 AC, pero los edificios son del final del Clásico, 750 a 900 DC. Destacan del sitio arqueológico de Tehuacán Viejo varias plazas, pirámides plataforma y habitaciones, palacios y tumbas, que luego fue abandonado en el Clásico Tardío y reocupado en el Postclásico, cuando los Popolocas construyeron los edificios monumentales. Resaltan un altar dedicado a Mictlantecuhtli mexica, el dios de la muerte, y restos que sugieren sacrificios humanos. Actualmente, sólo hay 3 plazas y unas 20 estructuras excavadas. La estructura más grande es una pirámide con templos en su parte alta. Después de la conquista española, los franciscanos construyeron el primer pueblo de Tehuacán en la base del cerro La Mesa en 1540, pero se abandonó y se fundó en 1568 un segundo pueblo en el lugar actual de la ciudad de Tehuacán.

La magia de los valles de Cuicatlán y Tehuacán

Después de leer dos terceras partes del libro, exactamente empezando en la página 203, en el Capítulo 7, por fin llegamos a lo que como biólogos realmente queríamos ver: la descripción de las plantas y ecosistemas de Tehuacán-Cuicatlán, y muy someramente, de los animales de la región.

Jerzy Rzedowski consideraba que la región de la cuenca superior de Papalopan —que incluye a los valles de Tehuacán

y Cuicatlán— es la región ecológicamente más diversa de todo México. Sus comunidades vegetales, van desde las selvas deciduas ricas en burseras (plantas a partir de las cuales se extrae el copal, ver adelante) y leguminosas, a los bosques de pino y oyameles en la punta de las montañas, pasado por encinares, chaparrales y densos bosques de cactus columnares o de altas palmas. Sin olvidar sus ricos agroecosistemas, donde se domesticaron inicialmente diferentes plantas cultivadas y donde todavía se conservan muchas variedades y formas criollas. En estos agroecosistemas sus característicos componentes han coevolucionado con malezas y otras hierbas, y con sus polinizadoras, más sus plagas, y con nosotros mismos, los humanos, sin olvidar el lado “invisible” que representan los microbiomas y micorrizas.

Destacan en la región grupos de plantas endémicas o casi endémicas a México como los agaves y sus parientes, o la familia de los ocotillos, Fouquieriaceae, o el linaje de los siempre espectaculares cactus columnares de Norte América, etc. Su proliferación fue en parte el resultado de la explosión evolutiva de plantas de zonas áridas que comenzó con procesos de sequía y enfriamiento que iniciaron en el Mioceno, hace 23 a 5 millones de años.

Yetman y Búrquez mencionan 365 especies de plantas endémicas para los valles de Cuicatlán y Tehuacán, es decir el 14% de su flora, que estiman tiene más de 2,600 especies de angiospermas (pero ver otros datos al principio de esta reseña y más abajo). Los autores se van a más detalle y explican que 40% de las 180 familias de plantas tienen cuando menos una especie endémica. Al comparar este dato con los valores totales de México, se entiende porqué nuestro país es un verdadero *hotspot* de biodiversidad. Específicamente se calcula que México en total tiene 24,360 especies de plantas vasculares, 19,235 son endémicas para todo el país, es decir el 42%.

Los valles de Cuicatlán y Tehuacán, explican los autores, han sido geológicamente estables desde el Terciario medio, pero el clima les permitió tener una vegetación más verde que se ha mantenido desde hace unos 2 millones de años al presente con lagos, y que hasta hace unos 12 mil vivió megafauna como bisontes, camélidos, gliptodontes, caballos prehistóricos y mamuts.

Yetman y Búrquez describen con detalle al matorral espinoso y sus aliados, como son las tetecheras (dominadas por *Neobuxbaumia tetetzo*) y los cardonales (dominadas por *Pachycereus weberi*), en los valles y bajadas de Tehuacán y del valle de Zapotitlán. Las partes bajas de estos valles están dominadas por plantas suculentas, principalmente cactus. Para darnos una idea de la diversidad, tan solo en el valle de Zapotitlán, nos hablan de hasta 16 especies de cactus columnares. Los autores nos describen como van cambiando las especies que podemos ver saliendo de Tehuacán, pasando por el valle de Zapotitlán hasta las zonas conocidas como La Cañada y Cañada Chica y hasta cerca de la ciudad de Oaxaca.

Aunque la anterior es la vegetación tal vez más interesante, también se describe el bosque tropical caducifolio, dominado en

la zona por varias especies de *Bursera*, leguminosas y árboles de euforbiáceas (parientes de la flor de nochebuena y de la yuca comestible). Además de las 21 especies de *Bursera* en la región, destacan por su tamaño el pochote, *Ceiba aesculifolia* (Malvaceae), y la chupandilla, *Cyrtocapra procera* (Anacardiaceae). También mencionan por su abundancia al cazahuate, *Ipomoea arborescens* (Convolvulaceae).

Adicionalmente, son de interés los palmares y matorrales, de los cuales describen densos bosques de *Brahea dulcis*, una palma chaparra que vive desde los 1800 msnm en adelante. Estas palmeras están a veces asociadas con el cactus columnar ramificado *Mitrocereus fulviceps* y con *Beucarnea stricta* y *Nolina longiflora*, estas últimas, aunque emparentadas con los agaves, pertenecían a lo que fue su propia familia (Nolinaceae) pero que ahora son parte de las Asparagaceae (como los agaves). En otras regiones domina *Brahea calcarea*, que es una palma alta, de más de 15 m, cuyos individuos se reconocen porque señalan las bajadas de agua.

Los chaparrales de la región son muy variables. Se distinguen porque señalan una transición entre el bosque deciduo tropical y los matorrales espinosos y encinares. Estos chaparrales incluyen arbustos, encinos pequeños, palmas, algunos cactus columnares, y a veces nopales, y numerosos agaves, y sus parientes como son las *Beucarneas*, *Nolinas* y *Dasylyriones*, junto con coníferas del género *Juniperus* y al árbol *Dodonea viscosa*.

Los encinares son abundantes y muy diversos, creciendo donde termina el matorral espinoso y el bosque caducifolio, hasta los 2200 msnm, cuando inician los bosques de coníferas, en particular de pinos. En el estado de Oaxaca se han descrito unas 52 morfoespecies de encinos, y mientras que algunas especies miden menos de un metro, otras pueden llegar a los 25 m de altura. En la parte este de la sierra Mazateca, de la Sierra Juárez y en la Sierra Monteflor, este tipo de bosques puede continuarse con bosque mesófilos de montaña.

Nuevamente, para darnos una idea de la gran biodiversidad de la región, nos señalan que en todo México hay unas 50 especies de pinos, y tan sólo en Oaxaca hay unas 14. En los valles que trata la obra hay unos 9 especies de pinos. Explican que los bosques de coníferas comienzan en la región a elevaciones relativamente bajas, a los 1800 msnm, a veces hasta en 1500 msnm, y siguen hasta la punta de las montañas, a 3 mil o más metros sobre el nivel del mar. Usualmente están formados por una sola especie de pino que muchas veces han sido intensamente talados. En La Cañada, los pinos dominantes son *Pinus lawsonii*, *P. patula*, *P. pringlei* y *P. devoniana*, en lugares más elevados, como a 3 mil metros, se mezclan con *Abies hickelii* y *A. religiosa*, con *Pinus ayacahuite*, *P. pseudostrobus*, *Cupressus lusitanicus*. En los lugares más secos se encuentra *P. montezuma* o en los más elevados, *P. hartwegii*.

Después Yetman y Búrquez abordan el tema de las adaptaciones de las plantas suculentas y semi-suculentas a los lugares secos, en particular de los dos principales grupos de cactus: por un lado, los nopales, choyas y similares, y por el otro, los cactus globosos, hemi-ésfericos, en forma de barril, trepadores,

columnares y candeliformes (columnares ramificados). Para los valles de Cuicatlán y Tehuacán hay en total 25 géneros y 89 especies de cactáceas, incluyendo, 26 especies de *Mammillaria*, cactus globosos pequeños en general, y 18-19 columnares repartidos en 10 géneros. De estos se menciona, muy brevemente a sus polinizadores nocturnos, especialmente murciélagos, y sus polinizadores diurnos, como son abejas, polillas, esfingidos, colibríes y aves percheras. También hablan de los dispersores de sus frutos, que son usualmente rojos, jugosos, y según los autores, deliciosos. Además, describen la distribución y aspectos notables de la ecología de cada una de esas 18 especies de cactus columnares. Desde nuestra perspectiva, esta es una de las secciones más interesantes y mejor ilustradas del libro, así que no decimos nada más para que, en serio, vayan a leer la obra.

Indudablemente el grupo más interesante de plantas tratadas en el libro son los agaves, que van desde plantas adultas que apenas son del tamaño de una mano, a gigantes que cubren más de 4 m de ancho. No queremos en este punto aburrir a las y los lectores con las maravillas de este género que, por ejemplo, L. Eguarte ha tratado en muchas ocasiones y que cualquier mexicano reconoce sin dudarlo. Solamente queremos en este momento mencionar que Yetman y Búrquez aceptan que muchos de los nombres científicos que se les dan a las especies de *Agave* (en general y en la zona) siguen siendo tentativos, debido a la complejidad, variabilidad y procesos incipientes de especiación e hibridación, que son rampantes en el género *Agave*. Eso sí, dicen que hay unas 35 especies de magueyes en los valles de Tehuacán-Cuicatlán, destacando *A. angustifolia*, el maguey espadín, usado para producir la mayor parte de los mezcales de Oaxaca, y por lo tanto de fama mundial. Discuten sobre otras especies útiles como *A. americana*, en particular la subespecie *oaxacensis*, que puede ser una planta enorme, y se usa también para hacer mezcal y pulque, o sobre *A. rhodacantha*, que se usa para obtener fibras, entre otros magueyes.

Otra de nuestras familias favoritas de plantas suculentas es la de los ocotillos, Fouquieriaceae, con sólo un género y 11 especies, que además de ser endémicas a Megaméxico (o sea México y partes contiguas del Sur de Estados Unidos en este caso, como definió J. Rzedowski), son espectaculares por sus estrambóticas formas, incluyendo los famosos cirios de Baja California (*F. columnaris*). En la región de Cuicatlán y Tehuacán hay dos especies endémicas, *F. purpusii*, llamado barrilito o jarilla con una distribución muy restringida al noroeste de Oaxaca y *F. formosa* llamada localmente tlapacón, que puede llegar a medir 10 m. Es posible que una tercera especie, *F. ochoterena*, se encuentre en la región al sur de Zapotitlán.

Tal vez sea difícil para los lectores imaginar que en los valles de Tehuacán-Cuicatlán haya cícadas, antiquísimas plantas que no producen flores. Las cícadas son plantas perennes de un grupo particular de gimnospermas, con un origen muy remoto, de hace más de 280 MYA. En México hay unas 45 especies del grupo, y en los valles de Tehuacán-Cuicatlán viven cuatro,

llamadas en la zona palmas reales (aunque no son palmas, obvio), todas del género *Dioon*. Desafortunadamente sus poblaciones actualmente son pequeñas y fragmentadas, y en parte esto se debe a que las han extraído coleccionistas y otras personas para usarlas como plantas de ornato y/o comercializarlas, a tal grado que hoy están en peligro de extinción.

La última sección del capítulo aborda otra de las importantes radiaciones adaptativas que han sucedido en México (y en el mundo), la de un género de árboles muy emblemático de las selvas secas de nuestro país: las *Burseras*. El tipo de vegetación dominado por burseras es a veces llamado cuajitotal. Las resinas de algunas de estos árboles son famosas por sus compuestos aromáticos que se extraen para producir los copales, que se usan en todo Mesoamérica. En México, según los autores, se han descrito 89 especies del género, y unas 20 siguen en espera de ser descritas. La mayoría son endémicas a México (unas 80 spp.) y 19 de ellas solo se conocen de una localidad (son microendémicas). Siguiendo la tradición de gran riqueza en número de especies de los valles de Tehuacán y Cuicatlán, 21 han sido reportadas para la región.

Para concluir esta extensa y detallada obra, Yetman y Búrquez nos llevan en el Capítulo 8, a su cerro favorito, Petlanco, que consideran el corazón de los valles de Cuicatlán y Tehuacán porque “encarna la multifacética diversidad de los valles”. El cerro se eleva apenas unos 40 m, pero en sus alrededores hay descubrimientos arqueológicos muy significativos, y cerca se localizan diversas sierras. El cerro aparentemente se formó por los depósitos de diferentes manantiales, que se secaron apenas en el 2006. Los autores manifiestan su preocupación por la causa de la desecación de esto manantiales, y por la perturbación causada por las actividades humanas como el pastoreo, corte de árboles, cacería, etc. aunque actualmente estas actividades están supuestamente limitadas por ser parte de Reserva de la Biosfera de Tehuacán-Cuicatlán.

Es en este cerro en donde se encuentra la muy rara *Fouquieria purpusii*, junto con su pariente *F. formosa*, además de diferentes especies de cactus columnares y árboles de las familias Anacardiaceae y Burseraceae, leguminosas y cactus de forma globosa y chicos de los géneros *Coryphanta* y *Mammillaria*. Ahí también abundan las plantas conocidas como “mala mujer”, *Cnidoscolus* spp., con sus bellas flores y pelos irritantes.

Resaltan los árboles más espectaculares del cerro Petlanco, que son *Bursera morelensis*, de más de 10 m de alto, y otras especies del mismo género. En Petlanco también hay *Ceibas*, *Ipomoeas* arbóreas y palo verde (*Parkinsonia praecox*). El lugar suena y se ve como de fuera de este mundo (ver foto de la página 329) y efectivamente merecería ser tratado y conservado como un jardín botánico vivo.

Más misterios de los valles de Tehuacán y Cuicatlán y posibles perspectivas

Mexico's Valleys of Cuicatlán and Tehuacán: From deserts to clouds

es una obra original y extraordinaria, muy bien ilustrada con fotos y numerosos mapas y figuras. Los autores demuestran un dominio notable de la historia natural, historia humana, geografía, ecología y literatura de la zona.

De cualquier forma, se nos ocurre que el libro tal vez podría ser mejorado en una siguiente edición. Nos gustaría ver, por ejemplo, mapas de la distribución de las especies o grupos de plantas más interesantes que, gracias a las nuevas tecnologías, se puede basar tanto en puntos de observación reales como en sus distribuciones potenciales. También extrañamos la presencia de algunos mapas o figuras y mejores datos que mostraran como cambiaron en el tiempo los climas y la vegetación, junto con análisis de clima y la vegetación en el futuro, que ayuden a evaluar mejor las perspectivas de conservación de una región única en el mundo ante escenarios de calentamiento global. Consideramos que también sería interesante ver mapas de zonas con mayor diversidad y endemismos dentro de estos valles.

Meditando sobre la situación de emergencia ambiental en el mundo y en México, se nos ocurre que sería muy importante que los autores propusieran y discutieran perspectivas realistas de los que se puede hacer no sólo para conservar la biodiversidad de estos valles, sino para ayudar a sus comunidades humanas, tan pobres, para que puedan vivir de manera digna, y que al mismo tiempo preserven esta biodiversidad. Además, nos gustaría leer propuestas para que se siga conservando la diversidad vegetal, y se logre que las poblaciones animales —especialmente de mamíferos— tan depauperadas actualmente, regresen y se puedan ver. Sería genial, por ejemplo, volver a ver venados y otros mamíferos en las zonas arqueológicas y otras partes de la reserva.

De igual manera, sería interesante que mostraran más claramente los diferentes recursos de vegetales de la zona que tienen valor para la agricultura, incluyendo formas criollas de las plantas cultivadas y sus parientes silvestres, agregando algunas ideas de cómo conservarlas.

Y pues obviamente, lo más relevante para nuestro país, sería que se hiciera una versión en español, conservando las fotografías, mejorando los mapas, expandiendo la parte biológica, y tal vez ordenando y condesando los otros aspectos.

Para concluir, sentimos que, en esta disfrutable obra, falta explicar y resolver de manera clara y lógica, los dos misterios centrales de los valles de Tehuacán-Cuicatlán ¿Por qué se mantienen tantas especies coexistiendo en un lugar más bien seco y tan aislado?... y el otro ¿Cómo se ha conservado, y sigue coexistiendo, esta biodiversidad con tanta gente, por tanto, tiempo?

Si no tiene en este momento posibilidad de viajar en persona a esta mítica y misteriosa región, sin duda la obra de David Yetman y Alberto Búrquez, nos ofrece un recorrido único que vale la pena hacer, y si pueden ir ¡el libro es una excelente introducción y guía a estos valles! Así que, no sean codos y vayan y compren este libro.

Luis E. Eguiarte es investigador del Laboratorio de Evolución Molecular y Experimental del Departamento de Ecología Evolutiva del Instituto de Ecología, UNAM. Estudia la ecología y evolución de las plantas, bacterias y animales de México, usando marcadores genéticos. Es editor de *Oikos=*.

Clementina Equihua Zamora es bióloga y doctora de la Facultad de Ciencias, UNAM. Como divulgadora de la ciencia ha colaborado en proyectos museográficos para el Museo UNIVERSUM y el Museo Interactivo de Economía (MIDE). Su trabajo editorial incluye publicaciones en revistas arbitradas, de divulgación y periodicos. Actualmente coordina la Unidad de Divulgación y Difusión del Instituto de Ecología.

Para saber más

- Yetman D. y A. Búrquez (2023) Mexico's Valleys of Cuicatlán and Tehuacán. From deserts to clouds. The University of Arizona Press. Tucson. USA. ISBN-13: 978-0-8165-4773-6. 364 págs.