

# ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

## Novedades científicas

¡Hongos que comen insectos!...  
¿Tienen propiedades medicinales?

La saliva, sustancia clave en  
la alimentación de los primates

Describir y conservar la  
biodiversidad en el Antropoceno

El chile (*Capsicum*) como  
objeto jurídico

Quimeras genéticas: reflexiones  
sobre la biología sintética

Novedades científicas  
desde la Universidad  
Autónoma Metropolitana

Chat GPT, el nuevo y asombroso  
*chatbot* de inteligencia artificial



**CONSEJO DIRECTIVO**  
**julio 2020 - julio 2023**

**Presidenta**

Estela Susana Lizano Soberón

**Vicepresidente**

José Antonio Seade Kuri

**Tesorero**

Dante Jaime Morán Zenteno

**Secretarios**

María del Jesús Rosales Hoz

Pedro Salazar Ugarte

**Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC**

Sección Centro-Occidente: María Patricia Arias Rozas

Sección Centro-Sur: María del Carmen Cisneros Gudiño

Sección Noreste: Oliverio Santiago Rodríguez Fernández

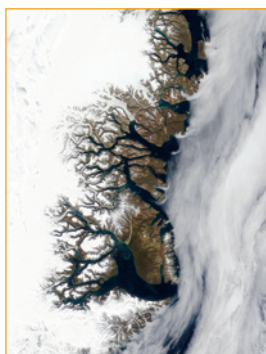
Sección Noroeste: Alfredo Ortega Rubio

Sección Sur-Sureste: Soledad María Teresa Hernández Sotomayor

■ Mensaje de la presidenta de la AMC	3
<i>Susana Lizano Soberón</i>	
■ Desde el Comité Editorial	4
<i>Alonso Fernández Guasti</i>	
<b>Novedades científicas</b>	
■ La saliva, sustancia clave en la alimentación de los primates	6
<i>Carlos Eduardo Ramírez Torres y Laura Teresa Hernández Salazar</i>	
■ Describir y conservar la biodiversidad en el Antropoceno	12
<i>José Luis Aguilar López y Rafael Villegas Patraca</i>	
■ ¡Hongos que comen insectos!... ¿Tienen propiedades medicinales?	18
<i>Lorena López Rodríguez, Cristina Burrola Aguilar y Roberto Garibay Orijel</i>	
■ Metales pesados: antagonistas de la salud en México	24
<i>Mayra Ramírez Cota, Ofelia Escobar Sánchez y Miguel Betancourt Lozano</i>	
■ Quimeras genéticas: reflexiones sobre la biología sintética	30
<i>Taller de Biología Sintética</i>	
■ Microfósiles marinos para reconstruir el pasado del océano y el clima	38
<i>Zubia Jocelyn Cisneros Ramos y Elsa Arellano Torres</i>	
■ ¿Transparencia es igual a cristalinidad?	46
<i>Aurelio Ramírez Hernández y Carmen María Estefanía Hernández Mota</i>	
■ Cloroplastos: modificación genética más allá del núcleo	52
<i>Jocelyn Ángel Gutiérrez y Claudia Mabel Munguía Méndez</i>	
■ El chile ( <i>Capsicum</i> ) como objeto jurídico	56
<i>José Ramón Cossío Díaz</i>	
■ El microbioma humano en la coyuntura entre la salud y la enfermedad	62
<i>Itzel Elizalde Rodríguez, Dianareli Hernández H. y Eugenia Silva-Herzog</i>	
■ Vehículos submarinos autónomos para un océano Ártico cambiante	70
<i>José Luis Lagunas Morales</i>	
<b>De actualidad</b>	
ChatGPT, el nuevo y asombroso <i>chatbot</i> de inteligencia artificial	80
<i>Adolfo Guzmán Arenas</i>	
<b>Desde la UAM</b>	
■ Novedades científicas desde la Universidad Autónoma Metropolitana	88
<i>Montserrat Alvarado González y Mario A. de Leo Winkler (coordinadores)</i>	
<b>Desde las redes</b>	
Estallidos cerebrales durante el fin de la vida	96
El cabello de Beethoven para encontrar las causas de su muerte	97
Bacterias árticas contra los plásticos	98
<i>José Eduardo González Reyes</i>	
<b>Noticias de la AMC</b>	
	99



Portada: Pixabay.



Separador: Pixabay.

**ciencia**, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 74, número 3, correspondiente a julio-septiembre de 2023, es una publicación electrónica trimestral, editada y distribuida por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C., con domicilio en Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N, Col. San Andrés Totoltepec, Alcaldía Tlalpan, C. P. 14400, Ciudad de México, tel.: 55 5849 4905, [www.revistaciencia.amc.edu.mx](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx), [rciencia@unam.mx](mailto:rciencia@unam.mx).

Editor responsable legal: Francisco Salvador Mora Gallegos. Número de Certificado de Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título: 04-2001-072510183000-102, expedido el 25 de julio de 2001; ISSN 2954-5285, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Fecha de última modificación: 24 de marzo de 2023. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371, expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación.

El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de sus autores y no refleja de manera alguna el punto de vista de la Academia Mexicana de Ciencias. Queda prohibida la reproducción total o parcial del contenido por cualquier medio sin la autorización expresa de la Academia Mexicana de Ciencias.

# ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias  
julio-septiembre 2023 volumen 74 número 3

## Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

## Director

Alonso Fernández Guasti

## Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero  
Dalila Aldana Aranda  
Raymundo Cea Olivares  
Gabriela Dutrénit Bielous  
Gerardo Gamba Ayala  
Adolfo Guzmán Arenas  
Juan Pedro Laclette San Román  
Miguel Ángel Pérez de la Mora  
Carlos Prieto de Castro  
Sergio Sánchez Esquivel  
Alicia Ziccardi Contigiani

## Editora

Rosanela Álvarez

## Social Media

José Eduardo González Reyes

## Diseño y formación

Intidriero, S.A. de C.V.

## Ilustradora

Ana Viniestra, pp. 7, 13, 19, 31, 39, 53  
Pixabay: pp. 8, 9, 10, 16, 25, 34, 35, 36, 43, 47, 57, 59, 60, 61, 66, 71, 79, 81, 82, 83, 84, 85  
Shutterstock: pp. 22, 32, 58, 63, 68, 4a de forros

## Red

Walter Galván Tejada

## Academia Mexicana de Ciencias, A.C.

Casa Tlalpan, km 23.5 de la Carretera Federal México-Cuernavaca, Av. Cipreses S/N,  
Col. San Andrés Totoltepec, Del. Tlalpan, C.P. 14400, Ciudad de México  
tel.: 55 5849 4905

[www.revistaciencia.amc.edu.mx](http://www.revistaciencia.amc.edu.mx)



@CienciaAMC

 **ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS**  
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio de la



**Casa abierta al tiempo**  
**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**

# Mensaje de la presidenta de la AMC

México, 13 de junio de 2023

## Estimados colegas:

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) es una institución muy valiosa para nuestro país. En ella se congregan investigadores científicos destacados en las áreas de ciencias exactas y naturales, ciencias sociales y las humanidades. Nuestra membresía representa una gran riqueza intelectual para impulsar el desarrollo de la ciencia en México, de manera que los mexicanos puedan acceder y disfrutar de los beneficios de la ciencia y la tecnología.

La historia nos ha mostrado que entender la naturaleza y aplicar ese conocimiento contribuye al bienestar del ser humano. Estamos convencidos de que México tiene la capacidad de avanzar mucho más en esta dirección y de llegar al nivel de los países más desarrollados del mundo. Desafortunadamente, el apoyo a la ciencia en los últimos años ha variado con las políticas de los diferentes gobiernos.

A partir de 2021, la AMC dejó de recibir los recursos necesarios para su operación por parte del ahora Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías. Por este motivo, nos vimos forzados a hacer una reestructuración considerable y tuvimos que disminuir de forma significativa las actividades de la Academia. Por falta de recursos, se cancelaron programas muy valiosos para la divulgación de la ciencia, como eran los Veranos de la Investigación Científica, los Domingos en la Ciencia y La Ciencia en tu Escuela. No obstante, pudimos llevar adelante los programas de premios, el ingreso de nuevos miembros, webinarios para jóvenes y público en general, cursos sobre temas científicos de actualidad, así como la publicación de la revista *Ciencia*, la cual se convirtió en una edición de libre acceso en línea.

Adicionalmente, en México hemos trabajado de cerca con otras instituciones, con academias y con asociaciones científicas para llevar a cabo actividades de promoción y difusión de la ciencia. También mantuvimos las relaciones internacionales con diversas redes científicas y academias de otras regiones del mundo para proponer soluciones a los problemas globales que aquejan a todos los países. Por ello, podemos decir que la Academia ha

sobrevivido y se ha fortalecido en este complejo periodo. Además, estamos convencidos de que podrá salir adelante para trabajar por el bien de nuestro país.

Escribo estas líneas muy cerca del final de mi gestión como presidenta de la AMC con la intención de agradecer a todos aquellos que han participado activamente en las labores de la Academia durante este periodo. En especial, agradezco a Dante Morán, María del Jesús Rosales, Pedro Salazar y José Seade, integrantes del Consejo Directivo, quienes navegaron conmigo en las turbulentas aguas de la reestructuración de la Academia; tuvimos que tomar muchas decisiones difíciles y siempre pude contar con una fuente de sabiduría y apoyo en el Consejo. Asimismo, agradezco a Renata Villalba y a todo su equipo de trabajo, quienes mantuvieron la operación de la Academia en condiciones adversas. Gracias también a los comités de Membresía y Premios por su gran labor y enorme compromiso con la calidad académica de sus rigurosas evaluaciones, las cuales se requieren para mantener el prestigio y el nivel de excelencia que caracteriza a nuestra Academia. De igual forma, agradezco el generoso apoyo de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), de sus coordinaciones, institutos y centros, que fue indispensable para poder llevar a cabo muchas de las actividades de la AMC.

Por último, un agradecimiento especial por el generoso patrocinio brindado a la revista *Ciencia* por parte de la UNAM y también de la Universidad Autónoma Metropolitana. También agradezco a Alonso Fernández Guasti, director de esta revista, y al Comité Editorial, quienes, aún en la incertidumbre, lograron sacar adelante el proyecto, con un contenido siempre valioso y vigente, que la ha consolidado como la mejor revista de divulgación científica del país.

Me despido de todos los miembros de la Academia deseándoles que continúen con éxito su trabajo científico y que apoyen a nuestra asociación para que pueda cumplir su importante misión. Ha sido para mí un gran honor ser presidenta de la AMC.

SUSANA LIZANO SOBERÓN  
Presidenta

# Desde el Comité Editorial

## Estimados lectores:

**N**uevamente les damos la bienvenida a otro número de Novedades científicas de la revista *Ciencia*. Como siempre, tenemos artículos muy interesantes, que abordan desde la importancia de unos compuestos químicos que hay en la saliva de los primates y que los protegen cuando comen plantas que pueden causarles algún daño, hasta el funcionamiento, usos potenciales y peligros de la nueva herramienta de inteligencia artificial conocida como ChatGPT. Esperamos que disfruten la lectura de cada uno de los textos.

El primer artículo, “La saliva, sustancia clave en la alimentación de los primates”, nos advierte: no olvides masticar bien tus alimentos, sobre todo si son vegetales..., pues las plantas han desarrollado mecanismos para defenderse de los animales que se las comen. En el segundo de los escritos, “Describir y conservar la biodiversidad en el Antropoceno”, los autores nos hablan de cómo la crisis ambiental actual –causada por la actividad humana– hace imperioso describir y conservar muchas especies en peligro de extinción; por el enorme esfuerzo que implica, ésta es una responsabilidad que corresponde a todas las personas en el mundo. Al mismo tiempo, como señala “¡Hongos que comen insectos!... ¿Tienen propiedades medicinales?”, enfrentamos otros problemas de seguridad alimentaria y de enfermedades infecciosas, crónicas o degenerativas; no obstante, algunos hongos pueden servir para regular plagas de insectos transmisores de patógenos y, además, fungir como fuente de alimentos y de fármacos con propiedades anticancerígenas o antivirales, para así ayudar a resolver estos problemas.

Por otro lado, un grupo de investigadores de Sinaloa nos advierte que los metales pesados pueden ser tóxicos, incluso en concentraciones muy pequeñas, si están presentes en productos cotidianos, como el agua potable. Por ello, es indispensable tener claro

qué actividades humanas generan contaminación por metales pesados en México, para implementar las medidas de prevención y saneamiento más adecuadas. En “Quimeras genéticas: reflexiones sobre la biología sintética” entendemos cómo esta disciplina estudia el diseño y la creación de nuevos circuitos genéticos que se incorporan a los organismos para conferirles habilidades particulares, con algunas posibles aplicaciones en medicina, energía y cuidado del ambiente. A continuación, las autoras de “Microfósiles marinos para reconstruir el pasado del océano y el clima” nos explican cómo estos fósiles diminutos nos ayudan a conocer las condiciones de los océanos y del clima en el pasado. La reconstrucción a partir de los componentes del sistema climático nos permite entender los múltiples riesgos del actual cambio global y hacer proyecciones a futuro.

En otro tema relacionado con la física, descubrimos cuál es la diferencia entre transparencia y cristalinidad, pues estos dos conceptos son muy distintos, a pesar de que en la vida cotidiana los usamos como sinónimos. Además, en otro artículo podremos aprender que la modificación genética de los cloroplastos de las plantas tiene enormes consecuencias benéficas, como evitar la resistencia a herbicidas o insectos y aumentar la tolerancia a la sequía. El ADN de los cloroplastos puede ser modificado para utilizar a las plantas como biofábricas de, por ejemplo, precursores de vacunas contra el cáncer. Y dado que no todos los temas de este número de la revista son de biología, presentamos “El chile (*Capsicum*) como objeto jurídico”, en el cual se exploran los aspectos de estas variedades vegetales que le corresponde al derecho regular, como la catalogación, cultivo, producción, distribución y, sobre todo, propiedad o protección de las especies biológicas. Así, los campos de cultivo (de chile o de cualquier otra planta), o bien los productos obtenidos de ellos, pueden ser materia de un contrato, mientras que su destrucción

puede motivar daños o perjuicios y el pago de indemnizaciones.

Las autoras de “El microbioma humano en la coyuntura entre la salud y la enfermedad” explican que nuestro cuerpo está compuesto tanto de células humanas como de miles de microorganismos (microbiota); así que somos mitad bacterias y mitad humanos... En este artículo se estudia el papel del microbioma en el metabolismo y el funcionamiento de muchos aspectos del cuerpo, que incluyen el sistema inmune y la conducta. El desbalance en el número y la calidad de estas comunidades microbianas deviene en enfermedades, por lo que su manipulación se está convirtiendo en una terapia alternativa. Por otro lado, “Vehículos submarinos autónomos para un océano Ártico cambiante” nos cuenta que este océano tiene condiciones climáticas muy severas, por lo que el uso de robots especializados permite registrar los cambios físicos y biogeoquímicos de esta región. Además, estos submarinos pueden llevar a cabo el monitoreo de la fauna y del tráfico marino con fines científicos y hasta económicos.

Seguimos con la sección De actualidad, que nos explica qué es ChatGPT. ¿En verdad hay una herramienta de inteligencia artificial que lo sabe todo? Casi..., pues ChatGPT puede aprender sobre lo que sucede y sucedió en el mundo mientras va leyendo y procesando rápidamente una gran cantidad de conocimientos, tomados de Wikipedia, páginas de internet y otras grandes bases de datos. Como muchos seres humanos, ChatGPT hace deducciones probables, quizás incorrectas; sin embargo, a diferencia de nosotros, esta herramienta aplica sus generalizaciones y muestra el resultado, pero no se da cuenta de que está mal. Por fortuna, los usuarios la pueden corregir, y así errará cada vez menos.

En esta ocasión, la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) nos presenta una serie de novedades científicas a partir de cinco diferentes proyectos de investigación que se desarrollan en sus diferentes

unidades. Los dos primeros se enfocaron en remover compuestos tóxicos y revertir algunos efectos negativos en el ambiente y la salud: el primero es un filtro, construido con materiales de bajo costo, que limpia la red de agua potable; el segundo tiene como objetivo reducir los residuos minerales tóxicos en el entorno mediante una cobertura planta-hongo cuya simbiosis permite a la flora local absorber metales pesados. Otros dos proyectos de investigación de la UAM se basan en el análisis de las señales eléctricas extraídas mediante electrodos colocados en los organismos bajo observación. Por un lado, se aborda la respuesta de las plantas ante estímulos bióticos, cuya detección permitirá controlar dispositivos electrónicos; por otro lado, se comparte un nuevo método de seguimiento fetal no intrusivo, alternativo al ultrasonido. Por último, actualmente se hacen estudios de diferentes redes neuronales para encontrar marcadores biológicos tempranos que ayuden a detectar alteraciones cognitivas en pacientes humanos.

Otra de nuestras secciones permanentes, Desde las redes, nos comparte un poco acerca de algunos temas que actualmente están presentes en las conversaciones de los medios digitales: qué ocurre con los estallidos cerebrales durante el final de la vida, cómo el cabello de Beethoven nos da luz sobre las causas de su muerte y cuáles bacterias pueden degradar los plásticos a bajas temperaturas. Ya por último, presentamos las actividades que recientemente ha organizado la Academia Mexicana de Ciencias, como webinarios, conferencias y charlas virtuales con autores de nuestra revista.

Esperamos que los temas y artículos que presentamos en este número sean de su interés. Agradecemos su preferencia y esperamos que sigan leyendo con entusiasmo la revista *Ciencia*.

ALONSO FERNÁNDEZ GUASTI  
Director

Carlos Eduardo Ramírez Torres y Laura Teresa Hernández Salazar

# La saliva, sustancia clave en la alimentación de los primates

Los primates se alimentan de algunas plantas que pueden producir compuestos tóxicos para evitar ser consumidas. Estas sustancias son detectadas por el sabor amargo u otras sensaciones que provocan, además de sus efectos dañinos. No obstante, los primates tienen un as bajo la manga, o más bien en su boca: la saliva es muy importante para su protección ante esta estrategia de defensa de las plantas.

## Introducción

En la naturaleza, cada especie animal conforma su dieta con diferentes tipos de alimentos, lo que ha servido para clasificarlas dependiendo de lo que consumen y la proporción en la que lo hacen. Si el único elemento de la dieta es la carne, se les clasifica como carnívoros; por ejemplo, los grandes felinos como el león (*Panthera leo*) o el jaguar (*P. onca*). En tanto, si consumen diferentes alimentos: carne, huevos, miel, semillas, hojas o frutos, se les denomina omnívoros; éste es el caso de los mapaches (*Procyon lotor*), los osos (*Ursus americanos*) y los coatíes (*Nasua nasua*). Cuando el consumo se basa en las partes de una planta, como hojas, flores, frutos, tallos, cortezas y pastos, entre otros, se trata de una dieta herbívora; algunos ejemplos son los de los primates mexicanos, como el mono araña (*Ateles geoffroyi*) o los monos aulladores (*Alouatta palliata* y *A. pigra*).

Al comparar el riesgo que implica para la salud mantener un cierto tipo de dieta, podríamos pensar que la carnívora es mucho más riesgosa que la herbívora, debido a que los animales carnívoros se exponen al contrataque de sus presas, o bien a que se les escapan y entonces se quedan sin la energía asociada al consumo de su caza. Sin embargo, depender de las plantas como único alimento también tiene sus riesgos, debido a que, para evitar ser consumidas, las plantas han desarrollado defensas. Éstas pueden ser físicas, como espinas o pelos urticantes que causan ardor, comezón e irritación severa. También hay defensas por medio de interacciones ecológicas, por ejemplo, con hormigas, las cuales defenderán a las plantas de posibles ataques a cambio de obtener refugio. Otra estrategia está en las defensas





químicas, pues algunas plantas pueden producir un tipo de compuestos –conocidos como metabolitos secundarios– cuya característica es un sabor amargo o también que provocan una sensación astringente o picante en la boca, y que, por lo general, tienen un efecto negativo en la fisiología del individuo que las consume. Por ejemplo, la planta digital (*Digitalis purpurea*) posee pétalos tóxicos que al ser consumi-

dos pueden causar taquicardia, sudoraciones, alucinaciones e, incluso, la muerte.

Como vemos, las plantas no dudan cuando tienen que defenderse ante el ataque de los herbívoros. ¿Cómo es que las plantas pueden ser tan dañinas o letales? ¿De qué maneras los animales pueden limitar el daño potencial que causan los metabolitos secundarios específicos? Para responder, debemos conocer un poco más acerca de estos compuestos.

### ■ Defensas químicas de las plantas

Las defensas químicas de las plantas dependen de los compuestos denominados metabolitos secundarios, los cuales reciben este nombre porque son sustancias que no se emplean directamente en la nutrición y el crecimiento del organismo que las produce, ya que su principal función es la defensa ante el ataque y consumo de los animales herbívoros y otros organismos dañinos, como las bacterias.

Se han descrito más de 100 000 tipos de metabolitos secundarios producidos por las plantas, los cuales se pueden agrupar en tres grandes grupos: terpenos, alcaloides y compuestos fenólicos. Estos últimos a su vez se subdividen en dos: taninos y flavonoides. Los metabolitos secundarios se pueden encontrar en diferentes partes de la planta, como en la corteza, en las hojas, en los frutos inmaduros y –aunque en una menor concentración– en los frutos maduros, ya que estos últimos tienen una mayor cantidad de azúcares y agua, lo que provoca la disminución de la concentración de metabolitos secundarios.

Los efectos que causan los compuestos defensivos de las plantas dependen del tipo de metabolito secundario consumido, la cantidad y la concentración. En general, entre la gran variedad de efectos negativos de estos compuestos, están la reducción de la tasa de crecimiento de los individuos, la disminución en la fecundidad y el daño en el hígado o los riñones; además, si son ingeridos en grandes concentraciones, pueden ser letales. No obstante, algunos metabolitos secundarios también producen efectos benéficos cuando se consumen en bajas concentraciones, pues actúan como antioxidantes, desinflamatorios, antisépticos y desparasitantes.



De manera general, en la dieta de los herbívoros se han encontrado algunos metabolitos secundarios como los taninos, los cuales son un claro ejemplo de un tipo de compuestos que pueden causar la mala absorción de nutrientes, debido a que interactúan fuertemente con las proteínas y enzimas encargadas de la digestión del alimento, lo que provoca una baja asimilación de proteínas (War y cols., 2012). Los taninos se encuentran en diferentes especies y partes de las plantas, debido a que les proporcionan protección contra bacterias, insectos y herbívoros.

Si se tratara de elegir, los animales preferirían consumir plantas o partes de plantas que no contengan taninos, aunque esto no es fácil de distinguir, y muchas veces los individuos se ven en la necesidad de comerlas. ¿Cómo es posible limitar el daño potencial que causan los metabolitos secundarios como los taninos?

#### ■ La saliva, fluido protector

■ Durante la ingesta, los alimentos primero son procesados en la boca mediante la masticación. Para facilitar este proceso se secreta saliva, la cual es un fluido compuesto por agua, minerales, proteínas, enzimas y residuos celulares, entre otros elementos, los cuales interactúan con los componentes de los alimentos para dar inicio al proceso de digestión.

En particular, el papel defensivo de la saliva contra compuestos como los taninos se debe a una clase de proteínas –conocidas como proteínas con afinidad a taninos– que se encargan de defender a los herbívoros de este tipo de metabolitos secundarios. Se cree que la cantidad de este tipo de proteínas en la saliva de los mamíferos depende del tipo de dieta; por ejemplo, en los carnívoros se ha registrado la ausencia de estas proteínas, o bien se han encontrado en pequeñas cantidades, mientras que hay una mayor proporción de proteínas con afinidad a taninos en los animales omnívoros y, por supuesto, en los herbívoros.

En la saliva hay dos grupos principales de este tipo de proteínas: las ricas en prolina, es decir, que tienen una gran cantidad del aminoácido prolina en la estructura que las forma, y las histatinas, un grupo de

proteínas pequeñas que tienen una gran cantidad del aminoácido histidina. La función de estos dos tipos de proteínas es unirse a los taninos e inactivarlos; de esta forma, se disminuye o evita la astringencia en la boca, lo que permite el consumo de la parte vegetal en cuestión y el aprovechamiento de sus nutrientes por las enzimas gastrointestinales, para que así los animales herbívoros puedan comer sin sufrir de malestar estomacal ni deban rechazar la comida por su sabor amargo.

Asimismo, se ha encontrado que las proteínas salivales ricas en prolina tienen una unión muy fuerte hacia los taninos que previene que este tipo de metabolitos secundarios se unan a otras proteínas y enzimas que desempeñan alguna función en la nutrición. Para el caso de las histatinas, se sabe que también se unen de manera eficiente a los taninos; sin embargo, considerando que la cantidad de histatinas en la saliva de los animales es menor comparada con la cantidad de proteínas ricas en prolina, se espera que estas últimas sean más efectivas para atrapar a los taninos que las histatinas (Pérez-Gregorio y cols., 2014).

#### ■ La saliva protectora de los primates

■ Los taninos tienen un papel relevante en la alimentación de los primates porque regulan su consumo de especies vegetales. Por ejemplo, se sabe que los chimpancés (*Pan troglodytes*), gorilas (*Gorilla gorilla*), colobos de Angola (*Colobus angolensis*) y mo-





nos araña (*Ateles geoffroyi*) son capaces de detectar la presencia de taninos en su alimento al identificar el sabor amargo que producen, por lo que evitan el consumo de ciertas partes de la planta si tienen una gran concentración de este tipo de metabolitos secundarios (Laska y cols., 2000). Incluso se ha visto que en vida libre los monos aulladores de manto (*Alouatta palliata*) se alimentan de hojas de árboles que no contienen altas concentraciones de taninos. A partir de estas observaciones surge la pregunta: ¿todos los primates producen saliva con proteínas neutralizadoras de taninos?

Por desgracia, todavía no sabemos cuántas especies de primates cuentan con esta defensa contra los taninos. Esto sólo se ha confirmado en los humanos

(*Homo sapiens sapiens*), el papión sagrado (*Papio hamadryas*) (Mau y cols., 2011), varias especies de macacos (*Macaca fascicularis*, *M. mulatta* y *M. arctoides*) (Schlesinger y cols., 1989) y el cercopiteco verde (*Cercopithecus aethiops*), todos primates omnívoros que incluyen cierta cantidad de plantas en su dieta. Para el caso de los siguientes primates mexicanos: monos aulladores de manto (*Alouatta palliata mexicana*), monos aulladores negros (*A. pigra*) —especies herbívoras que se alimentan principalmente de hojas— y monos araña (*Ateles geoffroyi*) —también herbívoros, pero que se alimentan principalmente de frutos—, se ha determinado que poseen proteínas ricas en prolinas (Espinosa-Gómez y cols., 2018; Ramírez-Torres y cols., 2022).

## ■ Conclusión

■ Como podemos observar, la saliva es un fluido muy importante no sólo para la nutrición por medio de la asimilación de oligosacáridos (azúcares) y la optimización de la digestión, sino que también ayuda a proteger e inhibir del daño hepático y renal en individuos que consumen materia vegetal. Esta viscosa secreción tiene aún muchos secretos, por lo que en la medida en que se conozca su reacción de defensa ante los metabolitos secundarios, podremos saber cómo es que los individuos van respondiendo o adaptándose a cambios químicos en su alimentación. En esta guerra de armas químicas, también será interesante ver cómo actúan las plantas. Mientras tanto, no olvides masticar bien tus alimentos, sobre todo si son vegetales.

### Carlos Eduardo Ramírez Torres

Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana.  
neri3838@gmail.com

### Laura Teresa Hernández Salazar

Instituto de Neuroetología, Universidad Veracruzana.  
tereherandez@uv.mx

## Lecturas recomendadas

- Espinosa G., F. C. *et al.* (2018), "Salivary tannin-binding proteins are a pervasive strategy used by the folivorous/frugivorous black howler monkey", *Am J Primatol*, 80(2):e22737.
- Laska, M., L. T. Hernández Salazar, L. E. Rodríguez y R. Hudson (2000), "Gustatory responsiveness to food-associated acids in the spider monkey (*Ateles geoffroyi*)", *Primates*, 41(2):213-221.
- Mau, M., A. M. de Almeida, C. A. Varela y K.-H. Südekum (2011), "First Identification of Tannin-Binding Proteins in Saliva of *Papio hamadryas* Using MS/MS Mass Spectrometry", *American Journal of Primatology*, 73:896-902.
- Pérez-Gregorio, M. R., N. Mateus y V. de Freitas (2014), "Selección e identificación rápidas de nuevos agregados de proteína salival-taninos solubles en saliva por espectrometría de masas (MALDI-TOF-TOF y FIA-ESI-MS)", *Langmuir*, 30(28):8528-8537.
- Ramírez-Torres, C. E. *et al.* (2022), "Influence of tannic acid concentration on the physicochemical characteristics of saliva of spider monkeys (*Ateles geoffroyi*)", *PeerJ*, 10:e14402.
- Schlesinger, D. H., D. I. Hay y M. J. Levine (1989), "Complete primary structure of statherin, a potent inhibitor of calcium phosphate precipitation, from the saliva of the monkey, *Macaca arctoides*", *International Journal of Peptide and Protein Research*, 34(5):374-380.
- War, A. *et al.* (2012), "Mechanisms of Plant Defense against Insect Herbivores", *Plant Signaling & Behavior*, 7(10):1306-1320.

José Luis Aguilar López y Rafael Villegas Patraca

# Describir y conservar la biodiversidad en el Antropoceno

La crisis ambiental actual causada por las actividades humanas plantea dos retos notables para la ciencia: describir y conservar la biodiversidad del planeta. En este artículo explicamos la dificultad de describir especie por especie la biodiversidad y resaltamos la necesidad de tener estrategias de conservación para evitar el creciente riesgo de extinción para especies conocidas y otras por descubrir.

## La biodiversidad actual en el planeta

**B**iodiversidad es un concepto propuesto en 1985 por el científico estadounidense Edward O. Wilson que se refiere en pocas palabras a la variedad de seres vivos que habitan el planeta. Según estudios científicos, la biodiversidad en la actualidad es mayor que en cualquier otra era de la historia de la Tierra. Las estimaciones más conservadoras indican que hay 5 millones de especies de seres vivos, mientras que los cálculos más aventurados predicen 20 millones.

Desde 1735 comenzó a usarse el sistema de clasificación taxonómico vigente, propuesto por el científico sueco Carlos Linneo en su célebre publicación “Systema Naturae” (“Sistema de la naturaleza”, en español; véase la Figura 1). A la fecha se han descrito aproximadamente 1.6 millones de especies. Esto indica que durante 288 años hemos descrito apenas entre 8% y 30% de las especies en la Tierra, dependiendo de las estimaciones del total. Si nos propusiéramos describir la biodiversidad completa en los siguientes 100 años, tendríamos que considerar

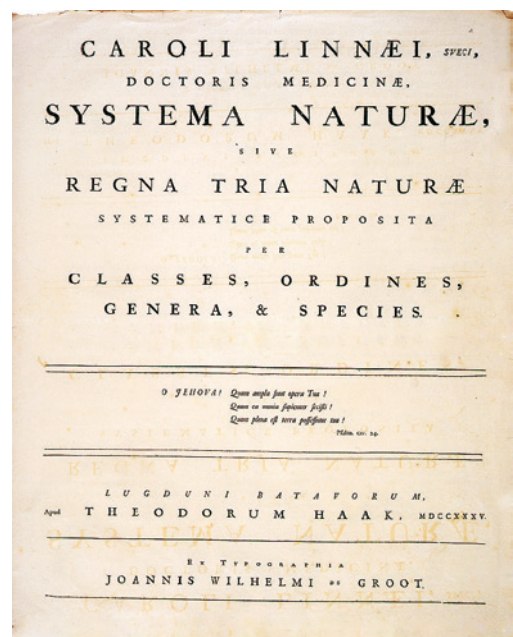


Figura 1. Portada del artículo científico “Systema Naturae” de Carlos Linneo. Fuente: Wikipedia (dominio público).



dos posibles escenarios: a) si los cálculos más conservadores fuesen correctos, entonces faltarían 3.4 millones de especies por conocer, y tendríamos que describir 90 especies al día; b) si la predicción de 20 millones de especies fuese real, entonces tendríamos que describir 500 nuevos taxones todos los días. Ambos escenarios suponen una empresa de proporciones épicas, ya que describir una especie no es una tarea fácil.

### ■ **La labor desde la ciencia**

■ El sistema de clasificación de las especies es jerárquico; es decir, consiste en grupos pequeños englobados dentro de grupos más amplios. En este sentido, *especie* es la unidad básica de clasificación taxonómica; por lo regular, varias especies conforman un *género*, varios géneros se agrupan en una *familia*, y así sucesivamente: las familias en *órdenes*, los órdenes en *clases*, las clases en *reinos* y los reinos en *dominios*. Así, describir y clasificar la enorme diversidad biológica del planeta son tareas en las que participan muchas personas dedicadas a la ciencia, principalmente a la biología, y en especial quienes se encargan de clasificar a los seres vivos desde la taxonomía.

Todo el trabajo que implica la descripción de una especie se resume en un artículo científico que debe pasar por una rigurosa evaluación de especialistas en el grupo biológico de estudio; el trabajo culmina con su publicación en una revista científica. Un artículo de descripción de una nueva especie por lo general incluye una “introducción”, que presenta un panorama de la diversidad conocida y la situación taxonómica del grupo biológico al que pertenece la especie que se está describiendo. En la sección de “material y métodos”, se describe con qué instrumentos y cómo se tomaron las medidas morfológicas o genéticas de los ejemplares, y con qué técnicas y procedimientos se analizaron para concluir que la especie es nueva. En la siguiente sección, “descripción taxonómica”, aparece el nombre único que se le asigna a la nueva especie, conformado por dos vocablos, por lo general en latín: el primero corresponde al género al cual pertenece la especie y el segundo vocablo distingue a la especie nueva de entre las otras que conforman el género.

Posteriormente se detalla toda la información posible de los ejemplares empleados para la descripción, como la ubicación exacta de su recolecta, características biológicas como edad y sexo, así como la colección científica donde están depositados. En la sección denominada “diagnóstico”, se describen las características que distinguen a esta especie de las demás del género. En la sección “variación” se mencionan, por ejemplo, las diferencias de coloración o morfología entre sexos o individuos de poblaciones distintas. Otras subsecciones incluyen información de los demás aspectos de la biología del taxón; por ejemplo, historia natural, ecología o estado de conservación. En la sección “etimología”, se describe el origen del nombre asignado a la especie, por lo regular relacionado con características morfológicas que la distinguen. Por último, en la “discusión”, se presenta un análisis a partir de la comparación con estudios anteriores, se identifican vacíos de información y pueden incluirse propuestas para estudios futuros.

Como se podrá notar, no es una tarea sencilla describir toda la biodiversidad del planeta especie por especie. Además, cabe considerar que esta labor se vuelve aún más difícil debido a que se hace contra reloj, pues los seres humanos hemos modificado de forma tan dramática los ecosistemas del planeta que el químico holandés Paul J. Crutzen ha denominado a la era actual como el Antropoceno. A decir de algunos científicos, esta era dio inicio a la par de la agricultura, hace unos 10 000 años.

### ■ **La era de la especie humana, el Antropoceno**

■ En la actualidad, la población humana ronda los 7 500 millones. Estudios recientes indican que las distintas actividades de nuestra especie han modificado la mitad de los ecosistemas del planeta, reemplazados principalmente por tierras destinadas a actividades agrícolas, ganaderas, industriales y para asentamientos humanos (véase la Figura 2). Las consecuencias para la sobrevivencia del resto de las formas de vida han sido desastrosas, pues han llevado a muchas especies a la extinción.

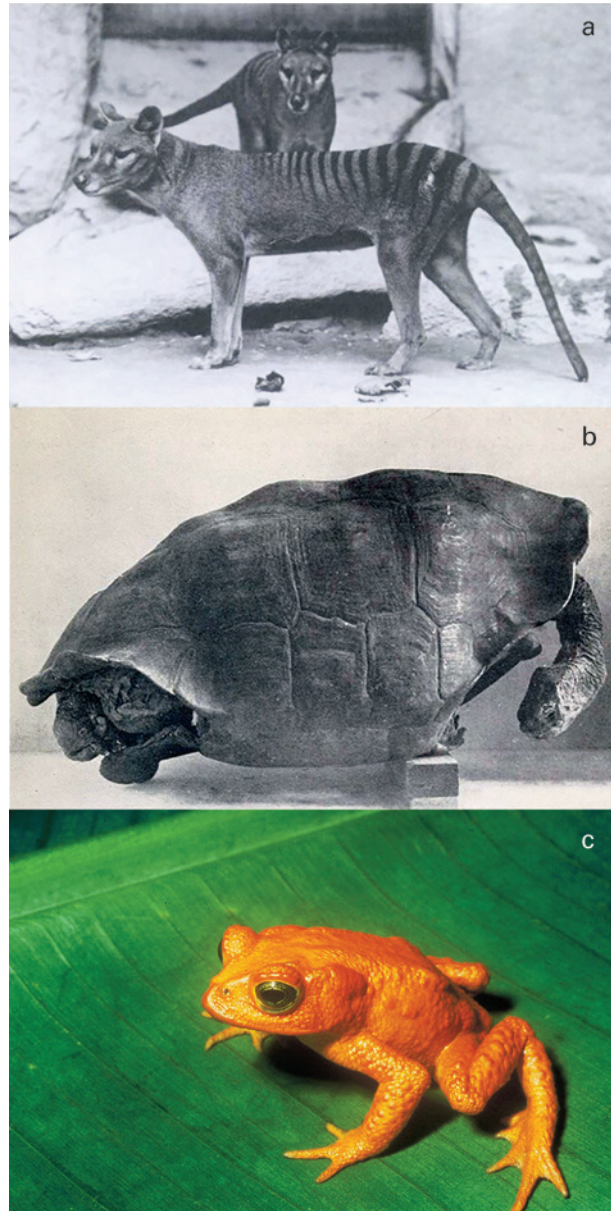
Entre los casos documentados en el mundo —tristemente más célebres— de animales que han desa-





**Figura 2.** Una gran proporción de la cobertura vegetal original del planeta se ha modificado principalmente hacia usos de suelo empleados para: a) ganadería, b) agricultura, y c) centros de población. Fotografías: José Luis Aguilar López.

parecido para siempre (véase la Figura 3) están: el tigre de la isla de Tasmania (*Thylacinus cynocephalus*), extinto en 1930; la tortuga gigante de la isla Pinta de Galápagos (*Chelonoidis abingdonii*), de la cual el último individuo murió en 2012; el sapo dorado (*Incilius periglenes*) que habitaba en la región de Monteverde, en Costa Rica, visto por última vez en 1989; y el



**Figura 3.** Entre los casos documentados de extinción se encuentran: a) el tigre de la isla de Tasmania, b) la tortuga gigante de la isla Pinta de Galápagos, y c) el sapo dorado. Fuente: Wikipedia (dominio público); figura 3c modificada de Fritz Geller-Grimm.

pájaro carpintero imperial (*Campephilus imperialis*) que vivía en México, especie que no se ha observado desde 1957. Pero también es lógico pensar que el proceso de extinción puede haber alcanzado ya a un número incalculable de especies que ni siquiera fuimos capaces de describir.

En este escenario, un nuevo reto para la ciencia no sólo es describir a las especies, sino lograr su conservación. Por este motivo, organizaciones interna-

cionales no gubernamentales se dedican a evaluar y clasificar a las especies con base en su nivel de riesgo de extinción. Por ejemplo, la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN, por sus siglas en inglés) considera tres categorías, que van de menor a mayor grado de riesgo de extinción: “amenazada”, “en peligro” y “críticamente amenazada”.

■ **Descripción de especies cerca de la extinción**

■ El estado de conservación y el nivel de riesgo de extinción de las especies se presenta en otra sección que es cada vez más común en los documentos científicos que describen a una especie nueva para la ciencia. Las que tienen un mayor riesgo se incluyen en la categoría de “críticamente amenazadas”. El elevado riesgo de extinción de estas especies se debe, principalmente, a que tienen áreas de distribución muy pequeñas, poblaciones compuestas por un reducido número de individuos o un grado



**Figura 4.** Algunas especies que al momento de ser descritas fueron consideradas como “críticamente amenazadas” son: a) la lagartija *Anolis peucephilus*, b) la salamandra *Chiropterotriton ceronorum*, y c) la cactácea *Cochemia thomasii*. Fotografías: Gunther Köhler, José Luis Aguilar López y Thomas Linzen, respectivamente.

elevado de pérdida o transformación de su hábitat.

En animales vertebrados, éste es el caso de la especie de lagartija bautizada con el nombre científico *Anolis peucephilus*, del sur de Oaxaca, descrita por Gunther Köhler y colaboradores en 2015 (véase la Figura 4a). Un ejemplo más es el de una salamandra descrita por Gabriela Parra y colaboradores (2020) en el centro de Veracruz, denominada *Chiropterotriton ceronorum* (véase la Figura 4b). En cuanto a las

plantas, la situación no es muy diferente; por ejemplo, la especie cactácea *Cochemia thomasi* (véase la Figura 4c), descrita en 2020 por Leccinum García Morales y colaboradores, cuenta con sólo una población conocida en el bosque tropical deciduo de Sinaloa.

### La conservación, tarea de todas las personas

La descripción de la biodiversidad es tarea de una gran cantidad de especialistas que se dedican a la ciencia desde sus diversas disciplinas, pero la conservación de las especies es una responsabilidad crucial de todas las personas. Es necesario y urgente tratar de disminuir los efectos negativos de la presencia humana en el planeta, con el fin de asegurar la supervivencia de la diversidad biológica y nuestra propia existencia. Quizá para muchas personas la extinción de una especie de entre 20 millones no sea gran cosa, pero ésta es una idea equivocada; como menciona el científico mexicano Héctor Arita: “La definitiva desaparición de una especie es un suceso lamentable, pues [implica] la desaparición de una historia que es el resultado de millones de años de evolución y la disminución no despreciable de la diversidad biológica del planeta” (Arita, 2016).

#### José Luis Aguilar López

Unidad de Servicios Profesionales Altamente Especializados, Instituto de Ecología, A. C.  
jose.aguilar@inecol.mx

#### Rafael Villegas Patraca

Unidad de Servicios Profesionales Altamente Especializados, Instituto de Ecología, A. C.  
rafael.villegas@inecol.mx

### Lecturas recomendadas

- Arita, H. T. (2016), *Crónicas de la extinción. La vida y la muerte de las especies animales*, México: Fondo de Cultura Económica/Secretaría de Educación Pública/Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.
- García-Morales, L. J., R. González-González, J. García-Jiménez y D. Lamónico (2020), “A new species of *Cochemia* (Cactaceae, Cactaceae) from Sinaloa, Mexico”, *Acta Botánica Mexicana*, 127:e1626. Disponible en: <doi.org/10.21829/abm127.2020.1626>, consultado el 15 de enero de 2021.
- Köhler, G., R. G. Trejo-Pérez, C. B. P. Petersen y F. R. Méndez de la Cruz (2015), “A new species of pine anole from the Sierra Madre del Sur in Oaxaca, Mexico (Reptilia: Squamata, Dactyloidae: *Anolis*)”, *Zootaxa*, 3753(5):453-468.
- Lee, A. C. y S. L. Pimm (2015), “Species, extinct before we know them?”, *Current Biology*, 25(5):177-180.
- Parra-Olea, G., M. G. García-Castillo, S. M. Rovito, J. A. Maisano, J. Hanken y D. B. Wake (2020), “Descriptions of five new species of the salamander genus *Chiropterotriton* (Caudata: Plethodontidae) from eastern Mexico and the status of three currently recognized taxa”, *Peer J*, 8:e8800. Disponible en: <doi.org/10.7717/peerj.8800>, consultado el 30 de enero de 2021.
- Platas-Rosas, L. J. (2019), *El curioso caso de la especie sin nombre. Anécdotas taxonómicas de muy diversos géneros*, México, Editorial Universitaria de Guadalajara.

Lorena López Rodríguez, Cristina Burrola Aguilar y Roberto Garibay Orijel



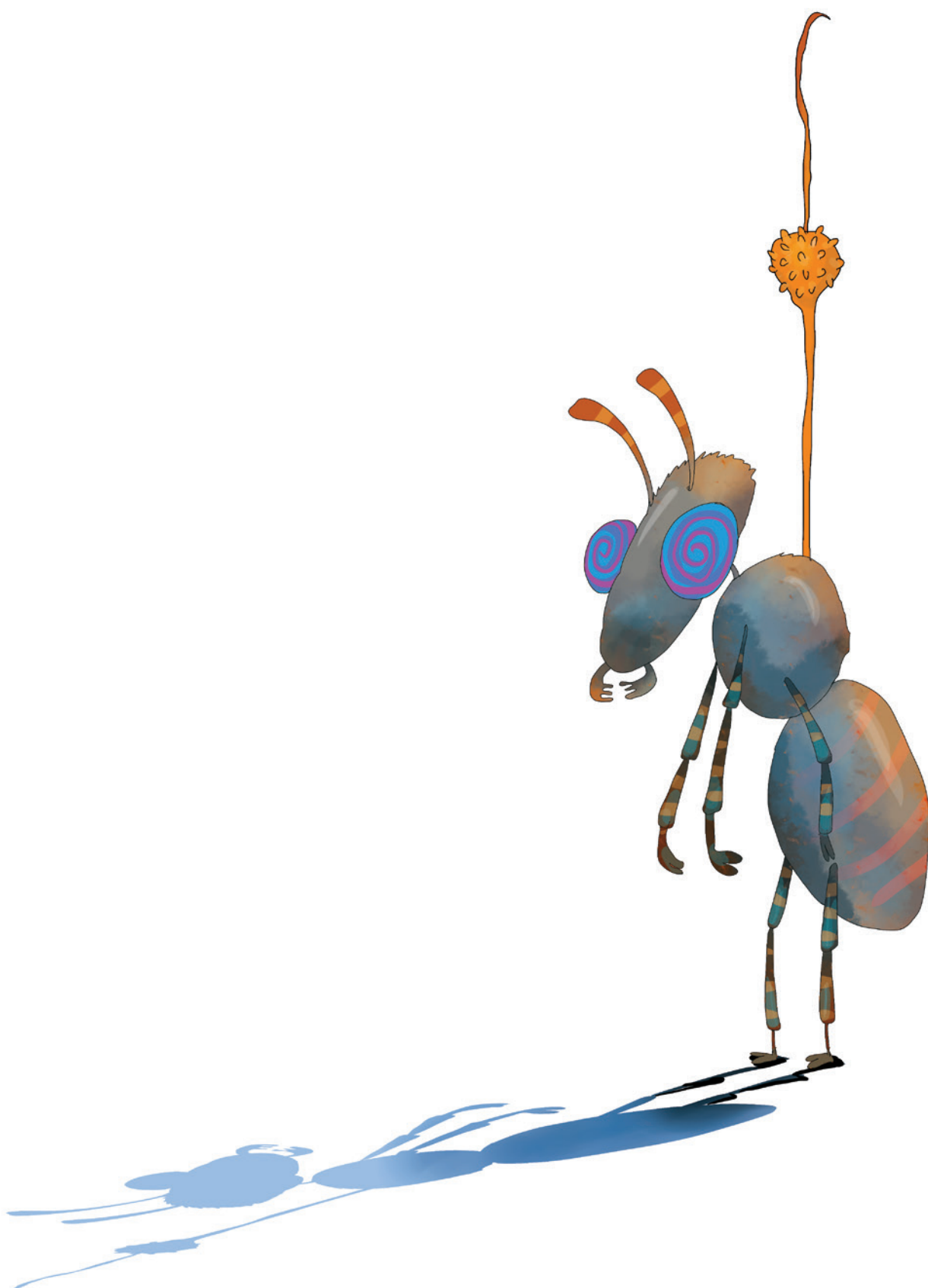
# ¡Hongos que comen insectos!...

## ¿Tienen propiedades medicinales?

En la actualidad, la humanidad se enfrenta a diversos problemas, como la seguridad alimentaria y las enfermedades infecciosas, crónicas o degenerativas. Afortunadamente, muchas especies de hongos ayudan a resolver estos problemas o disminuir su impacto. En particular, los hongos parásitos de insectos se pueden aprovechar como alimentos funcionales, pero además son altamente valorados por sus propiedades medicinales.

La seguridad alimentaria y la prevención de enfermedades forman parte de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas, lo que indica que en el mundo es prioritario llevar a cabo investigaciones enfocadas en estos temas. En la actualidad, la producción de alimentos es una actividad que requiere especial atención debido al crecimiento poblacional, la sobreexplotación de los recursos naturales y un ambiente cambiante, por lo que cada vez es más necesario experimentar con un mayor número de especies que puedan cultivarse, como una estrategia que permita diversificar las fuentes de alimentos, conservar los recursos en sus hábitats, así como proteger su diversidad y variabilidad genética. Al mismo tiempo, la incidencia de enfermedades degenerativas, crónicas e infecciosas, por ejemplo, cáncer, diabetes o covid-19, entre otras, está aumentando y con ello ha crecido el consumo de alimentos funcionales que, más allá del aporte nutricional, tienen un efecto benéfico para la salud humana, como es el caso de los hongos silvestres, y en particular algunas especies de hongos parásitos.

Debido a sus características biológicas, estos hongos han ganado una mayor atención en diferentes áreas prioritarias, como la agroindustria, alimentación, farmacología y medicina, por lo cual su estudio es importante para aprovechar las diferentes especies como alimentos funcionales y por sus propiedades medicinales. Cabe resaltar que gran parte de las investigaciones se han hecho en laboratorio y con especies asiáticas, donde son altamente apreciadas. No obstante, nuestro grupo de trabajo en México se ha enfocado a citar la presencia de este tipo



de hongos en diferentes entidades y a estudiarlas como controladores biológicos, más allá de su potencial como alimentos funcionales, pues hoy también es un tema prioritario en el mundo. En este sentido, es fundamental impulsar más investigaciones sobre su cultivo, sus componentes nutricionales y biofuncionales, no sólo para desarrollar un nuevo campo de conocimiento en la región, sino porque además permitirían ampliar el número de alimentos con potencial funcional para la población.

### ■ ■ ■ Los hongos parásitos

■ Si visitas un bosque o una selva, es muy probable que observes la presencia de hongos, los cuales son organismos muy diversos, con diferentes tamaños, formas, colores y múltiples funciones en la naturaleza. Los hongos que se alimentan de materia orgánica en descomposición se llaman saprobios y los podemos encontrar sobre la hojarasca, troncos en descomposición, excremento y otras superficies ricas en materia orgánica. Por otra parte, los micorrízicos se asocian benéficamente con las raíces de las plantas, ya que estos hongos les suministran sustancias nutritivas, minerales y agua, mientras que las plantas les proveen azúcares y vitaminas. Además, hay algunas especies de hongos parásitos que crecen, se desarrollan y reproducen en otros organismos –diferentes grupos de insectos, arañas, otros hongos e incluso pastos– y, con esto, afectan su crecimiento o supervivencia. Por ejemplo, los géneros *Ophiocordyceps* y *Cordyceps sensu lato* (s. l.) parasitan en su mayoría a insectos; sin embargo, también se han registrado creciendo en arácnidos y en otros hongos. La especie *C. nidus*, distribuida en Colombia, crece en nidos de tarántulas, mientras que *Tolypocladium ophioglossoides* parasita hongos que están enterrados en el suelo.

Aproximadamente hay 1 000 especies de hongos parásitos clasificadas en varios géneros, tales como *Beauveria*, *Cordyceps*, *Metarhizium*, *Ophiocordyceps* y *Tolypocladium*. En su mayoría, han evolucionado como parásitos y algunas especies son endófitas (se encuentran dentro de las plantas). Los hongos parásitos silvestres son muy peculiares cuando los encontramos en los bosques, ya que su fructificación,

llamado estroma, no tiene forma de sombrero, como los champiñones o las setas, sino que comúnmente tiene forma clavada, como un palo con la parte superior más gruesa (véanse las Figuras 1 y 2), con o sin ramificaciones. Las diferentes especies de estos hongos parásitos tienen colores amarillos, rojos, naranjas, cafés, negros y blanquecinos, con tonalidades desde brillantes hasta opacas. También tienen tamaños variables, pero en general son muy pequeños; por ejemplo, *Ophiocordyceps halabalaensis*, una especie que parasita a hormigas, mide entre 6.5 y 18 mm.

### ■ ■ ■ ¿Cuál es la importancia de estos hongos?

■ Por lo general, los hongos parásitos se encuentran en diversos grupos de insectos, en su mayoría mariposas, polillas y escarabajos, pero también se pueden observar en abejas, avispas, hormigas, pulgones, cigarras, chinches, saltamontes, grillos, langostas, moscas, mosquitos, cucarachas, mantis, tijerillas, li-



■ **Figura 1.** Ejemplo de *Cordyceps* sp. parasitando una pupa de palomilla. Colectado en Tenancingo, Estado de México. Fotografía de Lorena López Rodríguez, 2018.



**Figura 2.** Ejemplo de *Ophiocordyceps* sp. parasitando a un grillo. Colectado en Tenancingo, Estado de México. Fotografía de Lorena López Rodríguez, 2018.

bélulas, insectos palo, insectos hoja, entre otros. Esta característica biológica tiene la función de controlar las poblaciones de insectos que a veces son plagas. Un ejemplo es *Ophiocordyceps unilateralis*, que parasita hormigas y causa el efecto conocido como “hormiga zombi”, una infección que inicia cuando una espora del hongo se adhiere al exterior de la hormiga, germina, penetra al insecto y se desarrollan hifas que absorben nutrientes. En este proceso de infección, el hongo induce un cambio en el comportamiento de la hormiga, ya que ésta se desvía del camino, sube sobre el tallo de una planta y muerde el envés de una hoja; curiosamente, esto permite al hongo tener un microclima adecuado para la fructificación y dispersión aérea de sus esporas.

Además, esta cualidad biológica también es útil para controlar insectos transmisores (vectores) de enfermedades de importancia médica. Por ejemplo, *Metarhizium anisopliae* se ha utilizado en África para controlar a los mosquitos vectores de la malaria, enfermedad que afecta a cerca de 300 y 500 millones de personas cada año, de las cuales fallecen entre 1.5 y 2 millones. Asimismo, en México, Alberto García Munguía y cols. (2015) han probado en el laboratorio la eficiencia de *M. anisopliae* y *Beauveria bassiana* para controlar al mosquito *Aedes aegypti*, el cual es transmisor del dengue, la enfermedad emergente más importante del continente americano, que afecta entre 50 y 100 millones de personas cada año. En estos experimentos se ha encontrado un porcentaje

de infección de 90% en cinco días con ambas especies, lo cual indica que estos hongos parásitos son una alternativa ecológica con efectos positivos para el control de insectos vectores.

### ■ **Propiedades medicinales**

■ Aunado a la importancia agrícola y ecológica que tienen estos hongos, también presentan un alto valor medicinal, debido a que producen una gran cantidad de sustancias con actividad biológica benéfica para la salud humana. Las propiedades medicinales que se les atribuyen son antitumorales, antimetástasis, antioxidantes, antiinflamatorias, antimicrobianas, antivirales e inmunomoduladoras, las cuales son resultado de la actividad biológica de diferentes biomoléculas producidas por estos hongos, como son la cordicepina, didanosina, ergosterol, polisacáridos, glicoproteínas y péptidos. Por ejemplo, en el cultivo de *Cordyceps nidus* se han encontrado grandes cantidades de componentes benéficos, con hasta 3 744 metabolitos en extractos acuosos, entre los que se encuentran péptidos, vitaminas, ácidos orgánicos y azúcares; algunos de éstos son bioactivos, por ejemplo, la cordisinina con actividad antiviral y la fitosfingosina con actividad antibacteriana, antiinflamatoria y anticancerígena (Chiriví y cols., 2017). Adicionalmente, la pared celular de los hongos silvestres contiene dos compuestos con propiedades antitumorales, antiinfecciosas y antiinflamatorias: el ergosterol es una sustancia grasa precursora de la vitamina D, la cual participa en varias funciones, tales como mantener la regulación de calcio y fósforo para la integridad de los huesos y dientes, además de ayudar al sistema inmunológico y endocrino, entre otros; por otra parte, los  $\beta$ -glucanos son polisacáridos o azúcares que, además de formar parte de las plantas, se encuentran en los granos de cereales y algunas bacterias, y tienen varias funciones como estimulantes del sistema inmunitario.

Cabe resaltar que la mayor parte de los estudios sobre las propiedades medicinales de estos hongos se ha llevado a cabo en laboratorio y con especies asiáticas. Por ejemplo, los extractos de *Cordyceps kyushuensis* regulan la expresión de genes y otras mo-



léculas involucradas en el crecimiento, proliferación y formación de tumores en células humanas de pulmón. También se han estudiado sustancias específicas, por ejemplo, para el tratamiento farmacológico del VIH (virus de la inmunodeficiencia humana) mediante el antirretroviral didanosina, con el nombre comercial Videx, que se obtiene de *C. militaris*. Recientemente, un estudio computacional evaluó el potencial terapéutico de la cordicepina, producida por esta especie de hongo parásito, contra covid-19, y se encontró que dicha sustancia inhibió proteínas implicadas en la replicación del virus SARS-CoV-2, por lo que las investigaciones sugieren su uso para probar la eficiencia y seguridad en el tratamiento de esta enfermedad emergente.

#### ■ ■ ■ Hongos con alto valor

■ Actualmente, especies como *Ophiocordyceps sinensis* y *Cordyceps militaris* son altamente valoradas como hongos medicinales y se aprovechan en países como China y Corea. La especie *O. sinensis* ocupa el primer lugar como la más cara del mundo –incluso es denominada “el oro del Himalaya”–, con un costo de hasta \$60 000 USD/kg, según lo registrado en 2015. Esta especie únicamente se distribuye en el Tíbet, a una altitud de 3 000 a 5 000 m, y se encuentra en riesgo de extinción, en la categoría de “vulnerable”, debido a la disminución de su población por la sobreexplotación causada por su alto valor en el mercado. El cultivo artificial de esta especie para la obtención de cuerpos fructíferos a gran escala se ha logrado mediante un proceso lento, a partir de estu-

dios sobre su biología, la relación con su hospedero y la simulación del entorno alpino en el que se encuentra; de acuerdo con la literatura, se han alcanzado rendimientos anuales de 2.5, 5 y 10 toneladas en 2014, 2015 y 2016, respectivamente.

Como especies alternativas de *O. sinensis* se han cultivado en laboratorio diversas especies del género *Cordyceps* similares en la composición de sus biomoléculas, ya que contienen una amplia gama de nutrientes, como aminoácidos esenciales, vitamina E, K, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>12</sub>, muchos tipos de azúcares, proteínas, esteroides, nucleósidos, macro y microelementos, como potasio, sodio, calcio, magnesio, hierro, zinc, selenio, aluminio, cromo, entre otros; no obstante, más que como alimentos funcionales, su valor está relacionado principalmente con su efecto medicinal. La producción mundial de las diferentes especies de este género es de 83.2 a 182.5 toneladas por año. Hasta ahora, de las más de 1 000 especies de *Cordyceps s. l.* que se han descrito, 36 se han cultivado en el laboratorio para la producción de fructificaciones, de las cuales *C. militaris* es la que presenta el periodo más corto de producción. Este hongo infecta a capullos de palomillas y se ha reportado en diferentes partes del mundo. El aprovechamiento de esta especie es como un hongo medicinal y como un alimento funcional; el uso de sus fructificaciones y micelio es mayormente para productos de salud y medicamentos. También las fructificaciones se utilizan para cocinar sopas o guisados con pollo, pato o cerdo, o bien se preparan té o café. Su uso en sopas es muy popular en China, donde se recomienda una dosis segura de 2.5 g/kg de peso corporal. Con el micelio se ela-



boran productos alimenticios como líquidos orales, cápsulas, vinos, vinagres, infusiones, yogurts y salsa de soya, por lo que la presentación de *C. militaris* para su consumo es muy variable y en los mercados asiáticos se distribuyen más de 30 tipos de productos comestibles para mejorar la salud.

En México, a pesar de que se encuentran varias especies del género *Cordyceps s. l.* que tienen una importancia medicinal reconocida en los países asiáticos, como *C. militaris* y *C. pruinosa*, además de *Tolypocladium capitatum* y *T. ophioglossoides*, entre otras, estos hongos parásitos no son aprovechados como medicinales ni como alimentos funcionales, debido a que no se tiene una tradición para su consumo. En nuestro país sólo se han citado 17 especies que presentan importancia funcional; sin embargo, actualmente se llevan a cabo estudios sobre la biología, evolución, cultivo *in vitro* y metabolitos de especies silvestres mexicanas. En dichas investigaciones participan colaboradores de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex) y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Por ejemplo, *Cordyceps mexicana* es una especie recientemente descrita, cultivada en laboratorio, que produce cordicepina, sustancia en la que se han probado propiedades anticancerígenas y antitumorales (López-Rodríguez y cols., 2022).

## ■ ■ ■ Conclusión

■ Cuando camines por el bosque, tal vez podrás encontrar algunos hongos parasitando a una pupa o larva de mariposa, una gallina ciega, un escarabajo, un insecto palo, una araña, un nido de araña, otros hongos y hasta pastos. Recuerda que desempeñan una función importante, no sólo desde el punto de vista ecológico y agrícola, como reguladores y controladores biológicos de plagas e insectos transmisores de enfermedades emergentes, sino también en términos alimenticios y farmacológicos, ya que algunas especies son altamente valoradas por su propiedad anticancerígena y antiviral, lo cual los hace alimentos funcionales sumamente atractivos para la investigación.

### Lorena López Rodríguez

Centro de Investigación en Recursos Bióticos, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.  
llopezr\_s@uaemex.mx

### Cristina Burrola Aguilar

Centro de Investigación en Recursos Bióticos, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma del Estado de México.  
cba@uaemex.mx

### Roberto Garibay Orijel

Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México  
rgaribay@ib.unam.mx

### Lecturas recomendadas y referencias específicas

- Chiriví, J. et al. (2017), "Metabolomic profile and nucleoside composition of *Cordyceps nidus* sp. Nov. (Cordycipitaceae): A new source of active compounds", *PLoS ONE*, 12:1-27.
- Illana, C. (2007), "*Cordyceps sinensis*, un hongo usado en la medicina tradicional china", *Revista Iberoamericana de Micología*, 24:259-262.
- García-Munguía, A. M., H. Cortez-Madrigal, M. A. Velázquez-Machuca, M. Rebollar-Plata y M. Acosta-Ramos (2015), "Evaluación de *Metarhizium anisopliae* y *Beauveria bassiana* aislados de la Ciénega de Michoacán, México, para el control de *Aedes aegypti*", *Revista Biológico Agropecuaria Tuxpan*, 3:1060-1067.
- López-Rodríguez, L. y C. Burrola-Aguilar (2019), "Hongos parásitos de insectos y otros hongos: una alternativa de alimento funcional", *Agroproductividad*, 12:57-62.
- López-Rodríguez, L. (2022), "Temporada de hongos... Temporada de *Cordyceps mexicana*, una nueva especie para la ciencia", *Identidad Universitaria*, 19:7-8.
- López-Rodríguez, L. et al. (2022), "*Cordyceps mexicana* sp. nov., parasitizing *Paradirphia* sp. moths: A new sister species of the *Cordyceps militaris* complex, distributed in central Mexican *Quercus-Pinus* mixed forests", *Mycologia*, 114:1-16.
- Pérez-Villameres, J. C., C. Burrola-Aguilar, X. Aguilar-Miguel, T. Sanjuan y E. Jiménez-Sánchez (2017), "Nuevos registros de hongos entomopatógenos del género *Cordyceps s.l.* (Ascomycota: Hypocreales) del Estado de México", *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 88: 773-783.
- Rubio-Bustos, S. Y., L. Guzmán-Dávalos y J. L. Navarrete-Heredia (1999), "Especies entomopatógenas de *Cordyceps* (Fungi:Ascomycotina) en México", *Boletín IBUG*, 7:135-157.

Mayra Ramírez Cota, Ofelia Escobar Sánchez y Miguel Betancourt Lozano

# Metales pesados: antagonistas de la salud en México

Los metales pesados son elementos persistentes, imperceptibles y potencialmente tóxicos para el ser humano, aun en concentraciones pequeñas. Se deben dar a conocer las características y efectos de estos contaminantes para combatir la desinformación y regular su presencia en el ambiente. Muchas veces sin saberlo la población está expuesta, sobre todo al consumir productos cotidianos, como el agua potable.

## Introducción

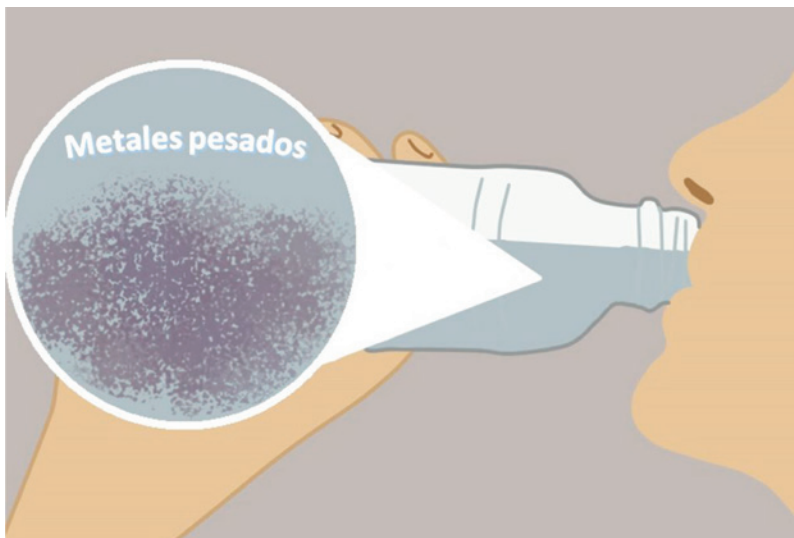
La contaminación por metales pesados no se refiere a la basura metálica convencional, sino a metales diminutos, desmenuzados, dispersos en el ambiente como producto de las actividades humanas, erupciones volcánicas y otras fuentes. Para que un metal pueda considerarse como “pesado” debe tener una densidad mayor de  $5 \text{ g/cm}^3$  (Jaishankar y cols., 2014). Varios elementos representados entre los periodos 4 y 6 de la tabla periódica pueden entrar en esta clasificación, incluidos algunos semimetales. El mercurio, el arsénico, el cadmio, el cromo y el plomo son considerados los de mayor relevancia por sus efectos dañinos para la salud humana, debido a que provocan presión arterial alta, daño fetal, afectaciones renales, trastornos cerebrales y cáncer (Jaishankar y cols., 2014; Chávez-Gómez y cols., 2016).

## Origen de los metales pesados

Los metales pesados proceden de la corteza terrestre. Su dispersión en el ambiente puede depender de una fuente natural o antropogénica que modifique su composición y los libere convertidos en contaminantes. Las erupciones volcánicas y la erosión por aguas termales son las fuentes de dispersión natural predominantes.

En cambio, las actividades antropogénicas que más contribuyen a la dispersión de metales pesados son la agricultura (por el uso de fertilizantes e insecticidas), la ganadería y la minería. También se pueden mencionar las industrias metalúrgica,





química, electrónica y farmacéutica; de igual manera, estos contaminantes pueden esparcirse al descargar aguas residuales, quemar combustibles, fumar (Jaishankar y cols., 2014) y por la práctica de oficios culturales como la creación de objetos con la técnica de barro vidriado (Chávez-Gómez y cols., 2016). En general, son tantas las actividades contaminantes, que actualmente muchos tintes, pinturas, muebles de madera, papeles, jabones, maquillajes y medicamentos contienen algún metal pesado (Jaishankar y cols., 2014). Lo anterior hace resaltar la importancia de hacer conciencia en torno a los daños relacionados con la contaminación por metales pesados, así como aplicar medidas para mantener un ambiente saludable y una mejor calidad de vida.

#### ■ **Vías de exposición y principales efectos**

■ La vía de exposición a metales pesados más peligrosa es la inhalatoria, cuyos efectos son rápidos, notorios y agresivos, como la inflamación de órganos (Chávez-Gómez y cols., 2016). Por el contrario, la vía dérmica suele ser de bajo riesgo, pues no todos los metales pueden absorberse por la piel (Reyes y cols., 2016; Gamboa-Loira y cols., 2020). Sin embargo, la exposición oral es la más frecuente, porque muchas plantas y organismos pequeños absorben metales pesados que después son consumidos por otros más grandes. De esta manera, hay especies depredadoras como el marlín y el atún que acumulan altas con-

centraciones de mercurio orgánico (metilmercurio) en sus músculos, lo cual implica a la postre un riesgo para el consumo humano. Asimismo, estos contaminantes se encuentran en ríos, pozos y lagos de donde se obtiene agua potable, por lo que muchas personas han estado expuestas por el simple hecho de beber agua o bañarse. Por esta razón, además de vigilar el contenido de metales pesados en los alimentos, es necesario monitorear su presencia en las diversas fuentes de agua.

Una vez que los metales entran al cuerpo humano, se unen a proteínas presentes en la sangre y se distribuyen hacia diversos órganos, sobre todo al intestino delgado, hígado, riñón, encéfalo y huesos. Después, una parte se almacena en los órganos y el resto se excreta por la orina y las heces. La filtración renal variará si los metales están unidos a otros elementos al momento de ser ingeridos y por la afinidad que tengan hacia las células de los riñones (Chávez-Gómez y cols., 2016).

#### ■ **Efectos de los metales pesados en la salud humana**

■ En particular, la toxicidad del mercurio puede agravarse cuando se une con otros elementos y forma compuestos orgánicos que se adhieren a diversos órganos, por lo que permanece más tiempo en el cuerpo y tiene efectos cancerígenos (Jaishankar y cols., 2014). Si el mercurio se presenta como sales inorgánicas es más soluble y provoca daño renal (Chávez-Gómez y cols., 2016). En cuadros severos de exposición, este metal tiene la capacidad de inducir daños neuronales, mala coordinación, espasmos, coma, malformaciones en el sistema nervioso de los fetos y el rompimiento de las membranas celulares; este último efecto inhibe que las células aprovechen la glucosa, lo que provoca fallas en la respiración celular y un desequilibrio en el metabolismo (Jaishankar y cols., 2014).

Por otro lado, el cadmio mantiene propiedades tóxicas similares entre todas sus especies químicas, pero esto no lo hace menos peligroso. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos de América estableció que los niños no deben usar ni beber agua con más de 0.00004 g de cadmio por litro, pues

a los 11 días de exposición presentarán reacciones adversas. Su deposición final suele ser los riñones, donde se acumula hasta por 30 años, lo cual incrementa el riesgo de daño renal (Reyes y cols., 2016). Se ha reportado que incluso una cantidad mínima de este metal en la sangre (0.41 µg por litro) puede provocar insuficiencia renal en adultos (Chávez-Gómez y cols., 2016). En el caso de una intoxicación aguda, el cadmio se relaciona con daño en el hígado, formación de piedras renales, deficiencia de hierro, acumulación de agua en los pulmones (edema pulmonar), impedimento de la absorción de calcio, debilidad en los huesos, alteración del ADN y malformaciones en fetos (Jaishankar y cols., 2014).

El arsénico es más peligroso cuando se encuentra en forma trivalente (con valencia química +3); los primeros síntomas que provoca son irritación de la piel, lesiones hepáticas y alteraciones nerviosas (Jaishankar y cols., 2014). Es más probable que cause una intoxicación severa cuando se encuentra disuelto en agua potable, debido a que presenta una absorción mayor de 80% (Chávez-Gómez y cols., 2016). Sus efectos crónicos son la inducción de diabetes (Currier y cols., 2014), presión alta, obstrucción de venas y arterias, daño neuronal, anemia, enfermedades cardiovasculares (Jaishankar y cols., 2014) y alteración del ADN (Rosales-Castillo y cols., 2003); también puede provocar cáncer de pulmón, vejiga, piel, hígado, riñón, próstata y mama (Maldonado-Escalante y cols., 2018; Gamboa-Loira y cols., 2020).

Las formas más comunes del cromo son la trivalente y la hexavalente. Esta última es extremadamente tóxica para los humanos, debido a que puede ingresar en las células con facilidad, dañar el ADN y provocar cáncer, en especial si se encuentra como cromato de calcio, cromato de plomo y cromato de zinc. Por otra parte, el cromo trivalente es un micronutriente esencial para el aprovechamiento de la glucosa, azúcar necesaria para el metabolismo; sin embargo, ingerirlo en cantidades altas puede mermar la salud. Asimismo, la exposición continua a cromo puede causar úlceras, tanto internas como externas, y afectar la producción de sangre (Jaishankar y cols., 2014).

Los efectos por la absorción oral de plomo dependen de la edad y el estado nutricional de la persona

afectada; por lo general, el daño es mayor en niños (50%) que en adultos (10-20%) y puede aumentar en personas que presentan deficiencia de hierro (Chávez-Gómez y cols., 2016). Casi 95% del plomo se almacena en los huesos (Jaishankar y cols., 2014) y afecta a la médula ósea roja, involucrada en la producción de sangre (Chávez-Gómez y cols., 2016). Los efectos agudos por exposición a plomo son: anemia, daño renal, parálisis de extremidades, malformación y muerte fetal, psicosis, autismo, alergias, dislexia, pérdida de peso, hiperactividad y trastornos cerebrales. También se demostró que el coeficiente intelectual de los niños desciende más de cinco puntos cuando su sangre presenta 10 µg de plomo por decilitro, y hasta 10 puntos cuando la concentración es de 40 µg por decilitro de sangre (Jaishankar y cols., 2014).

#### **Registros de enfermedades asociadas a la exposición de metales pesados en el agua**

La exposición a metales pesados en el agua ha provocado problemas de salud desde el siglo xx, sobre todo por la presencia de arsénico (Rosales-Castillo y cols., 2003). En México se han reportado altas concentraciones de este metaloide en al menos 36 acuíferos. Gamboa-Loira y cols. (2020) estiman que entre 400 000 y 2 000 000 de habitantes están expuestos a agua potable con concentraciones de arsénico superiores a la establecida por la NOM-127-SSA1-1994 ( $\geq 25$  µg por litro); destaca que 60% de las mujeres en Nuevo León, Sonora, Coahuila y Chihuahua están expuestas a concentraciones de arsénico mayores de 10 µg por cada litro de agua. La situación se agrava en poblaciones que carecen de tuberías públicas, pues las personas se ven obligadas a obtener agua potable de ríos, lagos y pozos, aun cuando se hayan reportado sus altos contenidos de arsénico; por ello, es común que los residentes de dichas comunidades presenten hiperpigmentación en la piel, erupciones, lesiones cutáneas y, en casos más severos, el riesgo de cáncer (Rosales-Castillo y cols., 2003).

Tampoco es una mera coincidencia que la creciente contaminación de arsénico vaya a la par del incremento de casos de diabetes e infartos. La ex-

posición crónica a este elemento por el uso y consumo de agua potable contaminada se asocia con el daño de órganos, enfermedades cardiovasculares y anormalidades en el aprovechamiento de la glucosa (Gamboa-Loira y cols., 2020); por ende, cualquiera que beba agua con niveles altos de arsénico estará en riesgo de contraer esas enfermedades. Currier y cols. (2014) indicaron que el consumo de agua potable con arsénico contribuyó a la aparición de diabetes en pobladores de la región Lagunera, Chihuahua y Zimapán en Hidalgo.

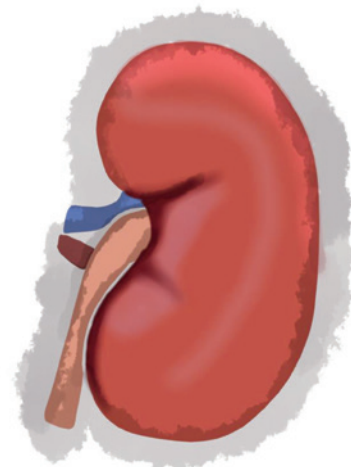
La edad también influye en los efectos asociados a los metales pesados. Esto se debe a la relación de la concentración ingerida con el peso corporal. Por ejemplo, es más riesgoso que un niño consuma 50 µg de arsénico a que los ingiera una persona adulta, por el simple hecho de que su cuerpo y órganos son más pequeños y su metabolismo es más alto; por esta razón, algunos autores han informado que la salud de los niños mexicanos está en riesgo. Maldonado-Escalante y cols. (2018) reportaron que los niños indígenas yaquis de Pótam y Vícam presentan daño en el ADN relacionado con que toman agua con altas concentraciones de arsénico, que supera incluso cuatro veces el límite establecido por la norma mexicana; por desgracia, este daño conlleva un alto riesgo de desarrollar enfermedades crónicas y cáncer. Otro caso alarmante es el del envenenamiento infantil en Torreón, Coahuila, por el consumo de agua y alimentos con plomo dispersado por las actividades industriales (Reyes y cols., 2016).

Las consecuencias en niños y adolescentes no siempre son físicas; por ejemplo, la exposición prolongada al arsénico puede interferir con la transmisión de información entre las neuronas, con efectos que no se ven ni suelen asociarse con factores ambientales, como depresión y alucinaciones. Aunado a lo anterior, Calderón y cols. (2001) mostraron que la exposición a arsénico puede disminuir la capacidad de memorización y afectar las habilidades verbales de los niños mexicanos; también concluyeron que la exposición a plomo genera problemas de atención. Dichos efectos llegan a agravarse si los niños tienen desnutrición y consumen poco hierro, zinc, selenio, ácido fólico y vitamina B12 (Chávez-Gómez y cols., 2017).

Lamentablemente, México presenta una variada incidencia de enfermedades relacionadas con la exposición a metales. La más preocupante es la insuficiencia renal crónica. Algunos autores han logrado relacionar la aparición masiva de esta patología en ciertas zonas, como el poniente del Estado de México, con la exposición a mercurio, arsénico, cadmio y plomo por razones ocupacionales. Entre ellos, Chávez-Gómez y cols. (2017) destacaron la importancia de atender la situación, pues esta patología es una de las primeras diez causas de mortalidad en el Instituto Mexicano del Seguro Social, con aproximadamente 377 casos por cada millón de habitantes; sin embargo, los médicos no suelen considerar la contaminación por metales cuando diagnostican a sus pacientes e ignoran que la aplicación oportuna de un tratamiento quelante puede evitar la patología crónica causada por las exposiciones. Además, se estima que el sector público gasta más de 180 millones de dólares anuales para atender a los pacientes con hemodiálisis, pero esta cantidad no llega a cubrir ni 25% de los gastos necesarios para atender a todas las personas con enfermedad renal crónica (Chávez-Gómez y cols., 2017).

■ **Conclusión**

■ Quizás parezcan muchos los datos aquí mencionados, pero son sólo la punta del iceberg. Los registros de contaminación no equiparan a los estudios de riesgo poblacional. Se necesitan más investigaciones



para esclarecer los riesgos sanitarios de las comunidades, pues muchas personas en México se enferman y no tienen la posibilidad de saber qué las está afectando ni cómo pueden tener un tratamiento adecuado. En congruencia con el derecho humano a la salud, se debe distribuir información entre la población y asegurar que todas las personas sean capaces de identificar elementos potencialmente tóxicos, incluso en algo tan “claro” como el agua.

Esta situación debe atenderse con rapidez o, de lo contrario, todos nos veremos afectados. Si bien es imposible detener las actividades antropogénicas que generan contaminación por metales pesados, se debe dedicar un especial énfasis en identificar cuáles están provocando más daño, para a partir de ello implementar las medidas de prevención y saneamiento más adecuadas. Asimismo, es necesario incrementar la inversión de recursos en la educación del personal

médico, proyectos de investigación, regulación legal y desarrollo de productos remediadores que permitan contrarrestar a estos antagonistas invisibles para mejorar la calidad de vida de la población mexicana.

#### Mayra Ramírez Cota

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa.  
mayraraco@gmail.com

#### Ofelia Escobar Sánchez


Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa.  
escobars.ofelia@gmail.com

#### Miguel Betancourt Lozano

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, Unidad Mazatlán.  
mbl@ciad.mx

### Referencias específicas

- Calderón, J., M. Navarro, M. Jiménez-Capdeville, M. Santos-Díaz, A. Golden, I. Rodríguez-Leyva, V. Borja-Aburto y F. Díaz-Barriga (2001), “Exposure to arsenic and lead and neuropsychological development in Mexican children”, *Environmental Research*, 85(2):69-76. Disponible en: <doi.org/10.1006/enrs.2000.4106>, consultado el 27 de marzo de 2021.
- Chávez-Gómez, N., A. Cabello-López, R. Gopar-Nieto, G. Aguilar-Madrid, K. Marín-López, M. Aceves-Valdez, C. Jiménez-Ramírez, M. Cruz-Angulo y C. Juárez-Pérez (2017), “Enfermedad renal crónica en México y su relación con los metales pesados”, *Revista Médica del Instituto Mexicano del Seguro Social*, 55(6):725-734.
- Currier, J. M., M. C. Ishida, C. González-Horta, B. Sánchez-Ramírez, L. Ballinas-Casarrubias, D. S. Gutiérrez-Torres, R. H. Cerón, D. V. Morales, F. A. Terrazas, L. M. Del Razo, G. G. García-Vargas, R. J. Saunders, Z. Drobná, R. C. Fry, T. Matoušek, J. B. Buse, M. A. Méndez, D. Loomis y M. Stýblo (2014), “Associations between arsenic species in exfoliated urothelial cells and prevalence of diabetes among residents of Chihuahua, Mexico”, *Environmental Health Perspectives*, 122(10):1088-1094. Disponible en: <doi.org/10.1289/ehp.1307756>, consultado el 15 de marzo de 2021.
- Gamboa-Loira, B. M., E. Cebrián y L. López-Carrillo (2020), “Arsenic exposure in northern Mexican women”, *Salud Pública de México*, 62(3):262-269. Disponible en: <doi.org/10.21149/11085>, consultado el 8 de marzo de 2021.
- Jaishankar, M., T. Tseten, N. Anbalagan, B. B. Mathew y K. N. Beeregowda (2014), “Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals”, *Interdisciplinary Toxicology*, 7(2):60-72. Disponible en: <doi.org/10.2478/intox-2014-0009>, consultado el 8 de marzo de 2021.
- Maldonado-Escalante, J., D. Meza-Figueroa, A. Figueroa, L. García-Rico, J. Burgess, C. Lantz, L. Yáñez, M. Martínez-Cinco, J. Cortés, I. Fernández y M. Meza-Montenegro (2018), “An integrated health risk assessment of indigenous children exposed to arsenic in Sonora, Mexico”, *Human and Ecological Risk Assessment*, 25(3):706-721. Disponible en: <doi.org/10.1080/10807039.2018.1449098>, consultado el 10 de marzo de 2021.
- Reyes, Y., I. Vergara, O. Torres, M. Díaz-Lagos y E. E. González-Jiménez (2016), “Contaminación por metales pesados: implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria”, *Ingeniería, Investigación y Desarrollo*, 16(2):66-77. Disponible en: <doi.org/10.19053/1900771X.v16.n2.2016.5447>, consultado el 16 de septiembre de 2022.
- Rosales-Castillo, J. A., L. C. Acosta-Saavedra, R. Torre, J. Ochoa-Fierro, V. H. Borja-Aburto, L. López-Carrillo, G. G. García-Vargas, G. B. Gurrola, M. E. Cebrián y E. S. Calderón-Aranda (2004), “Arsenic exposure and human papillomavirus response in non-melanoma skin cancer Mexican patients: a pilot study”, *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 77(6):418-23. Disponible en: <doi.org/10.1007/s00420-004-0527-0>, consultado el 25 de septiembre de 2022.



# Quimeras genéticas: reflexiones sobre la biología sintética

*En memoria del profesor Adhermar Liqitaya Montiel, cuya pasión por esta disciplina nos inspira hasta hoy. Siempre te recordaremos.*

La biología sintética se enfoca en el diseño y la creación de nuevos circuitos genéticos que se incorporan a los organismos vivos para conferirles habilidades diferentes a las que normalmente tenían. Aquí describimos los orígenes de esta disciplina, la diferencia con la ingeniería genética, algunas de las posibles aplicaciones y su impacto en la actualidad.

Quimera fue un terrible monstruo, famoso en la mitología griega. Según cuenta la historia, tenía cabeza de león, cuerpo de cabra y cola de serpiente. Como todos los terribles monstruos famosos, al menos los mitológicos, murió a manos de un héroe no menos célebre, Belerofonte, quien logró dicha hazaña montado sobre Pegaso, el caballo alado. La imaginación de los dioses del Olimpo era lo único necesario para poder crear quimeras, pegasos, centauros, hidras y demás criaturas a voluntad. A los humanos, con todas nuestras limitaciones, no nos queda otro remedio que usar estrategias diferentes para diseñar criaturas similares, aunque con resultados mucho más modestos.

Una de estas estrategias es la biología sintética, rama que estudia la base material y funcional de los sistemas biológicos que puedan ser diseñados, creados, modificados y utilizados. Como toda buena definición, ésta nos pone límites porque deja fuera muchas de las características de dicha disciplina. Una de ellas es que entre sus herramientas está la que permite “cortar y pegar” el ADN. ¿Con esto no podríamos tomar parte del ADN de un león, parte del de una cabra y parte del de una serpiente para hacer una quimera?



La idea de “cortar y pegar” el ADN de los seres vivos no es nueva ni exclusiva de esta disciplina, ya que es una de las herramientas que comparte con la ingeniería genética. Este último término se acuñó para describir aquellos desarrollos biotecnológicos que permitían, entre varias cosas, transferir genes de un organismo a otro. La tecnología del ADN recombinante, conocida como la acción de “cortar y pegar” el ADN, se desarrolló desde hace casi 50 años y se ha utilizado en múltiples aplicaciones. Una de las primeras, y más conocidas, es la producción de insulina humana por bacterias *Escherichia coli* modi-

ficadas. Dichas “bacterias quiméricas” permitieron tener una producción más rápida y económica de esta hormona, para mejorar con ello la calidad de vida de las personas diabéticas.

Entonces, ¿para qué inventar más nombres, como el de biología sintética, y acrecentar la confusión? Para responder, quizá valga la pena mencionar qué diferencia hay con la ingeniería genética. En el centro del paradigma contemporáneo de la disciplina que nos atañe, hay un debate no sólo con respecto al diseño y la creación de nuevos seres vivos con alguna utilidad, sino también en torno a la posibilidad



de homogeneizar los estándares de diseño utilizados. En otras palabras, el dilema se refiere a si es posible concebir a los seres vivos como un ensamble coherente de unidades funcionales o módulos que se pueden diseñar y configurar más o menos de una manera flexible.

### Orígenes de la biología sintética

A inicios del siglo XX, el biólogo francés Stéphane Leduc utilizó el término *biología sintética* para proponer una concepción de la vida según la cual las formas y dinámicas de la física y de la química pudieran explicar la estructura y función de los seres vivos. En el segundo volumen de su serie *Etudes de biophysique*, convenientemente titulado *La Biologie Synthétique*, Leduc recapitulaba un esfuerzo empírico para comprender la vida a partir de la reproducción por fuerzas físicas y sustancias químicas de todos los fenómenos biológicos, y con ello explicaba la continuidad entre la materia viva y la no viva, paso a paso. Luego entonces, Leduc se preguntaba si es posible crear una célula desde cero a partir de los ingredientes químicos que la componen.

Las técnicas del ADN recombinante fueron el primer acercamiento para crear sistemas biológicos utilizando el conocimiento adquirido respecto a la manera en que el ADN instruye la síntesis de los bloques materiales de la vida. Sin embargo, la tarea de la ingeniería genética con la tecnología del ADN recombinante implicaba, de alguna manera, sólo to-

mar las instrucciones de un organismo y colocarlas en la maquinaria molecular de otro ser vivo.

En el año 2000 se dio un gran paso para la biología sintética, pues se publicaron los primeros reportes con respecto a circuitos genéticos que daban una función diseñada de manera externa a una célula. Por un lado, se encontró el *toggle switch* (interruptor de palanca), que buscaba simular en los circuitos de retroalimentación genéticos dos estados estables que pudieran ser modificados con señales externas, justo como en un interruptor que permite cambiar el flujo de la corriente eléctrica dependiendo de su posición. Por otro lado, el descubrimiento de otros circuitos y su posterior diseño externo, como el del **represilador**, llevó a la elucidación de circuitos oscilatorios que mantuvieran a las células en más de dos sistemas estables que pudieran cambiar dependiendo de los estímulos externos. Adicionalmente, en los inicios de este milenio, cual augurio de los cambios en la manera en que se desarrolla la biología del siglo XXI, quienes empezaron a trabajar en la rama de la biología sintética se comenzaron a cuestionar seriamente si era posible extender los dominios de las máquinas y de lo vivo para crear organismos que fueran programables.

Uno de los fundamentos del diseño de organismos en la biología sintética es el uso de partes biológicas que tengan el mismo estándar para cualquier investigación o emprendimiento. Estas partes han sido llamadas *biobricks* en inglés, emulando la idea de ladrillos o bloques de construcción que pueden

**Represilador**  
Circuito genético sintético que produce oscilaciones entre dos estados en la expresión de genes.



organizarse en distintas configuraciones conforme a la creatividad de quien los usa. Estos *biobricks*, o biopartes, se podrían considerar como unidades funcionales estandarizadas del ADN, como si fueran componentes de un circuito digital.

La visión optimista de la biología sintética apunta a que, teniendo un catálogo de estas biopartes, sería posible diseñar y crear sistemas o construcciones genéticas del mismo modo que se hace en la ingeniería con los circuitos o con los bloques de construcción. De esta forma, dichas construcciones genéticas pueden insertarse en células vivas para conferirles capacidades diferentes, que van desde producir o sintetizar sustancias hasta realizar operaciones lógicas y resolver computacionalmente problemas matemáticos, para constituir así verdaderas computadoras vivas. Este enfoque ya se ha implementado en cierta medida y, a pesar de sus limitaciones, ha tenido resultados asombrosos.

### Aplicaciones e implementaciones de la biología sintética

No sería posible aquí ser exhaustivos al describir las aplicaciones y desarrollos en los que trabajan numerosos grupos, tanto en universidades y centros de investigación como en la industria. Pero nos centraremos en algunas que nos parecen particularmente interesantes o prometedoras, o que dejan claro los alcances de la biología sintética.

Una de las primeras aplicaciones de la biología sintética surgió directamente de la idea del *toggle switch*. Considerando que las condiciones en las que se desarrollan los seres vivos pueden influir en los estados en los que se encuentre el interruptor de un circuito genético, resulta intuitivo crear un interruptor que ayude a detectar ciertas condiciones ambientales y enviar una señal de regreso dependiendo de lo que se encuentre. Estos tipos de indicadores –o, propiamente dicho, biosensores– se han implementado en diversas maneras.

La biorremediación es una tecnología que emplea el potencial metabólico de distintos sistemas biológicos para promover la destrucción o transformación de ciertos compuestos químicos contaminantes en

otros menos nocivos para los organismos y para el ambiente. Son muchos los casos de éxito en los que se han tratado sitios contaminados por compuestos como hidrocarburos, solventes, explosivos, pesticidas y otros. Sin embargo, para restaurar aquellas áreas afectadas por sustancias recalcitrantes, como las dioxinas, plaguicidas o incluso compuestos radioactivos, parece ser evidente que se necesitan organismos biológicos con una mayor capacidad metabólica. La biología sintética plantea soluciones ante problemas como éste y provee herramientas óptimas para la biorremediación. Esto se logra reemplazando o agregando circuitos genéticos y regulatorios modificados en ciertas células para conferir la capacidad de degradar los compuestos problemáticos, de tal forma que el organismo integra el contaminante a su metabolismo, lo procesa y convierte en sustancias de desecho totalmente inocuas.

Por otra parte, en el campo de la medicina se pueden implementar estrategias de la biología sintética para el tratamiento de diversas enfermedades; por ejemplo, el cáncer. En general, puede decirse que las células que se vuelven cancerosas tienen un “conflicto de identidad” y por una multitud de posibles causas empiezan a dividirse de manera descontrolada. Esto se detecta a nivel de los genes que se encuentran “prendidos” o “apagados”. En la actualidad hay esfuerzos de investigación dirigidos a desarrollar circuitos genéticos sintéticos que, una vez implantados en las células, las capaciten para detectar, a su vez, si otra célula es cancerosa. Si además se puede inducir a las células cancerosas a una muerte celular programada, o suicidio celular, se tendrá entonces una terapia no invasiva contra esta enfermedad, pues únicamente se estaría actuando contra las células cancerosas en el momento en que se detecten en el cuerpo. Algo similar se podría implementar en el diagnóstico y tratamiento de las infecciones, al capacitar mediante construcciones sintéticas a las células del cuerpo para desplegar una reacción más rápida y efectiva contra los virus y bacterias.

En un ámbito relacionado, también es posible utilizar microorganismos modificados, dotados de funciones no naturales, para producir precursores de fármacos costosos. Uno de los casos más conocidos



es el de la producción de artemisinina, extraída de la planta *Artemisia annua*, que se usa para combatir la malaria. Esta sustancia puede ser sintetizada por métodos químicos, pero con costos económicos muy altos. En la actualidad, se obtiene dicho fármaco gracias a la biosíntesis de un precursor, llamado ácido artemisínico, en levaduras, lo cual reduce significativamente los costos de producción.

#### ■ Algunas implicaciones

■ A pesar de las aplicaciones e implementaciones descritas arriba, es importante mencionar que la realidad biológica es mucho más compleja que la inserción de circuitos para lograr que los organismos lleven a cabo nuevas funciones. Una de las críticas que frecuentemente recibe el paradigma de la biología sintética es por tratar a los sistemas biológicos de una manera francamente reduccionista. En efecto,

detrás de esta visión hay una suposición, más o menos explícita: que entender el comportamiento de las componentes de un sistema podría permitir conocer su dinámica y comportamiento general. Los seres vivos, y en general los sistemas biológicos, constituyen ejemplos por excelencia de que esta concepción no es válida en general. De las interacciones de unidades relativamente simples, o al menos susceptibles de ser descritas con cierto detalle, surgen comportamientos y propiedades nuevas que están muy lejos de poder ser entendidos y, mucho menos, predichos.

Si bien esta incertidumbre intrínseca de la biología sintética es una de las razones que frena el desarrollo de nuevas propuestas, también se deben resolver otros retos para poder explotar el potencial que se le atribuyó a esta disciplina a inicios del presente milenio y que hasta ahora ha resultado insatisfactorio. Por ejemplo, muchos de los proyectos exitosos de la biología sintética se han limitado a diseñar un solo circuito compartido por todas las células modificadas, sin considerar aquellos casos en que las células forman parte de un todo más complejo, o bien ha creado circuitos que sólo puedan dar origen a un número limitado de estados estables.

La biología sintética busca complejizar y superar las limitaciones que le han impedido explotar su potencial mediante –entre otras medidas– el uso de consorcios microbianos, que son comunidades de dos o más especies de microorganismos que coexisten en una relación de ayuda mutua. La biología sintética ha comenzado a trabajar con estas comunidades de microorganismos reconociendo que se pueden intervenir diferentes microorganismos de manera paralela para que los circuitos genéticos se compartan entre los integrantes del consorcio microbiano sintético. Un ejemplo de esta estrategia es el proyecto SynBio4Flav, cuyo objetivo consiste en crear consorcios microbianos sintéticos que puedan producir flavonoides, una familia de compuestos de origen vegetal que han mostrado tener propiedades benéficas para la salud y la industria. Desde SynBio4Flav se construyen los elementos necesarios para crear circuitos genéticos que, al ser distribuidos en diferentes organismos microbianos, permitan

la síntesis de estos compuestos de una manera más rápida.

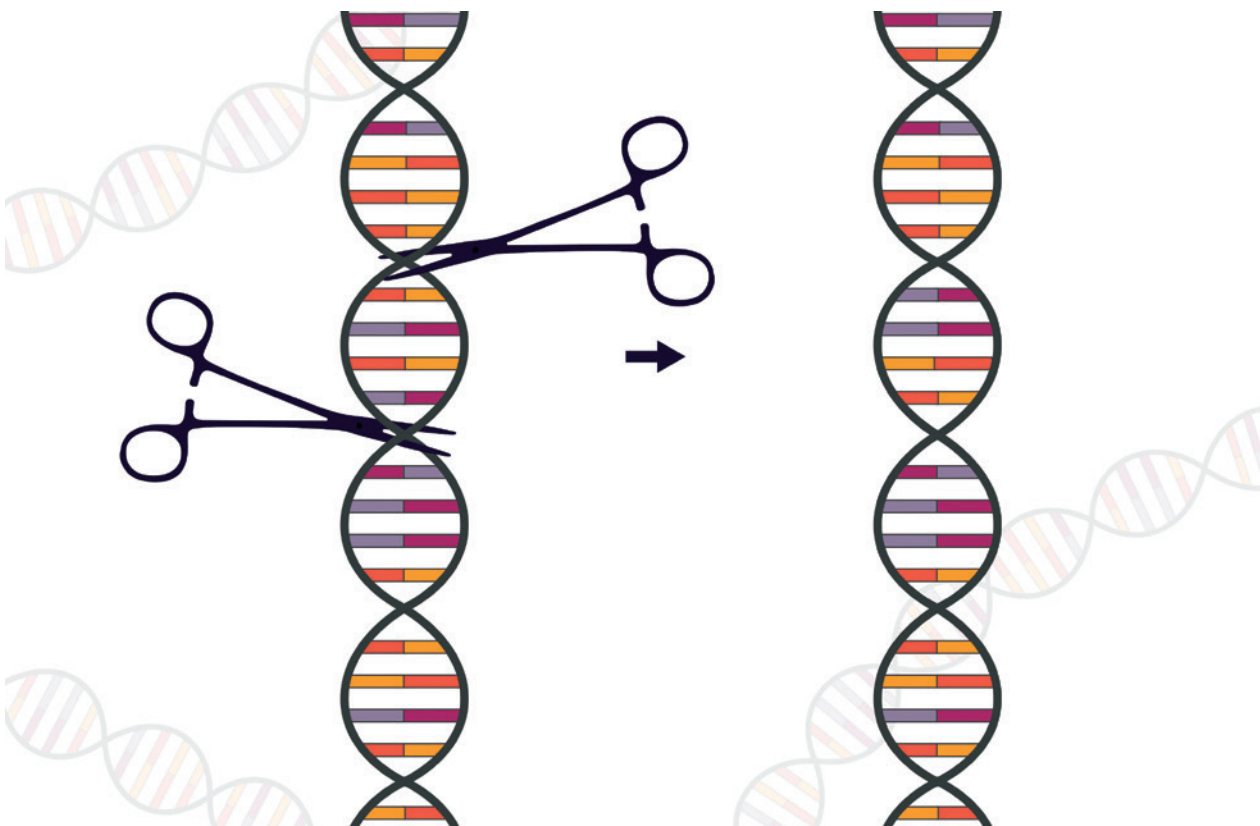
Estas últimas propuestas aún deben madurar y desarrollar las capacidades de escalabilidad que permitan su implementación industrial, así como la robustez de los circuitos para tener células multies- tables capaces de responder a diferentes estímulos de manera predecible. A pesar de lo anterior, resulta esperanzador que los organismos genéticamente modificados, así como los organismos sintéticos, pueden funcionar dentro de los contextos y usos específicos para los cuales fueron diseñados, lo cual, más que re- futar la complejidad de los seres vivos, se convierte en un tema profundamente apasionante para inspi- rar nuevos descubrimientos y concepciones sobre este fenómeno que llamamos vida.

### ■ La biología sintética y la sociedad

■ Los contextos de descubrimiento e implementa- ción de los desarrollos tecnológicos invariablemente estarán marcados por las condiciones socioeconómi- cas y culturales en las cuales surjan; en este sentido,

los desarrollos biotecnológicos no son la excepción. El potencial de generar nuevos métodos de diagnós- tico y terapias, sensores, entre otros, es inmenso, pe- ro no se debe dejar de lado la reflexión y la acción desde la ciencia y demás sectores de la sociedad para analizar cómo las innovaciones tecnológicas se in- corporan a nuestro mundo actual. Se prevé que a mediano y largo plazo los avances de la biología sin- tética, junto con otras disciplinas, como la nanotec- nología, modifiquen en gran medida el estilo de vida de la sociedad.

Uno de los objetivos del arte es reflejar y tratar de reproducir la realidad por medio de las herramientas de las que dispone cada artista, así como a partir de las percepciones sobre el mundo en donde vive. Es una forma de conciencia social. Al igual que la cien- cia, el arte es un poderoso instrumento de reflexión y reconocimiento de nuestro entorno. El surgimiento de la biología sintética ha inspirado la imaginación hacia nuevas realidades que buscan imitar las impre- siones que nos genera el mundo natural. Algunos ar- tistas se imaginan cómo serían las cosas si pudieran abstraer lo surreal al mundo físico; es decir, si fuera



posible romper los límites de la naturaleza, imitarla y hacerla sintética. Este pensamiento permaneció en las mentes creativas y surgió como una corriente artística: el bioarte. Eduardo Kac es considerado pionero, con sus obras “Gen artístico” y “Alba” (un conejo que produce una proteína fluorescente), presentadas en 1999 en el Festival Ars Electrónica, en Brooklyn. En la actualidad, somos espectadores de una multitud de esfuerzos, tanto de artistas que usan técnicas de biología sintética como de especialistas científicos que abordan tareas artísticas, quienes con sus obras buscan tener un acercamiento con la sociedad, más allá de cualquier utilidad que puedan tener la ciencia o las expresiones artísticas, además de reflejar nuestras expectativas e incluso temores.

En la mitología clásica, Prometeo era un Titán conocido por estar a cargo de la creación de los hombres, junto con su hermano Epimeteo. Prometeo no sólo dotó a los hombres con todo aquello que fuera necesario para sobrevivir, sino que les regaló una chispa proveniente del carro del Sol, con lo cual pudieron dominar y utilizar el fuego, que les permitiría desarrollar todos los dones otorgados, las ciencias y las artes. Dicha acción enfureció a Zeus, quien con-

sideraba el fuego un elemento divino. En respuesta, Zeus creó a la primera mujer, Pandora, a quien envió a los hombres con una caja que contenía todos los males del mundo. Pandora, al abrir la caja, liberó estos males para culminar la venganza de Zeus. Las metáforas de este episodio mitológico parecen evidentes: el conocimiento y el poder de dominación sobre todas las ciencias y las artes, representadas por el fuego, pueden suponer las dos caras de una misma moneda: la capacidad para mejorar el mundo y ponerlo a nuestro servicio, pero también poder desencadenar consecuencias desastrosas para nuestro porvenir.

### Conclusiones

Los avances en la biología sintética han prometido numerosos beneficios en distintos ámbitos: medicina, energía, ambiente, investigación básica, entre otros. No obstante, al tratarse del diseño con fines pragmáticos de sistemas biológicos inexistentes, los estudios en este campo se ven constantemente implicados en múltiples discusiones éticas, legales y sociales. Conforme las barreras de escalabilidad y robustez que hoy frenan a la biología sintética vayan superándose, nos familiarizaremos con la importancia de reflexionar acerca de las implicaciones de estas acciones y la responsabilidad que adquirimos al impulsarlas.

La posibilidad de dotar a organismos de capacidades o características que normalmente no poseen, e incluso la perspectiva de generar vida desde cero, abre las puertas a reflexiones en torno a las consecuencias y los riesgos de crear estos organismos sintéticos. Esto obliga a todos los agentes sociales involucrados en el desarrollo e implementación de la biología sintética a actuar de una forma responsable bajo un principio precautorio, que por un lado permita el desarrollo de aquellas tecnologías útiles para la humanidad, pero que a la vez evite las consecuencias negativas, ya sea para la humanidad, el ambiente o la sociedad. Así como hemos observado que los consorcios microbianos se organizan para garantizar la supervivencia y el beneficio mutuo, nuestras acciones deben considerar que no existi-



mos de manera aislada al resto de los seres vivos, incluidos aquellos que nos sirven para algún propósito. Por ello, los debates éticos en cuanto a la bioseguridad y contención del riesgo biológico, así como las reglas y leyes que deriven de dicho debate responsable y precavido, tendrán que venir acompañados de una reflexión sobre nuestro papel y responsabilidad como humanidad, hacia el planeta y con el resto de los seres vivos que en él habitan.

### Taller de Biología Sintética

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.  
ciencias.igem2020@gmail.com

#### Integrantes del Taller de Biología Sintética (2019-2020):

Paola J. Aldana Vanegas, José A. Alonso-Pavón, Alison S. Cervantes Contreras, María S. del Río Pisula, Andrés Garibay Luzaurreta, Natalia Godínez Aldana, Gabriela Guzmán Favila, Adhermar Licitaya Montiel, Luis J. Martínez Lomelí, Benjamín Mendoza Téllez, Ingrid Miranda-Pérez, Pablo Padilla Longoria, Carlos Pimentel Ruiz, Miguel A. Rosas Paz, Mario Sánchez-Domínguez y Karen Santillán-Garrido.

#### Referencias específicas

- Anderson, J., N. Strelkova, G. B. Stan, T. Douglas, J. Savulescu, M. Barahona y A. Papachristodoulou (2012), "Engineering and ethical perspectives in synthetic biology: Rigorous, robust and predictable designs, public engagement and a modern ethical framework are vital to the continued success of synthetic biology", *EMBO Reports*, 13(7):584-590.
- Cameron, D. E., C. J. Bashor y J. J. Collins (2014), "A brief history of synthetic biology", *Nature Reviews Microbiology*, 12(5):381-390.
- López del Rincón, D. (2015), *Bioarte. Arte y vida en la era de la biotecnología*, vol. 33, Madrid, Akal.
- Meng, F. y T. Ellis (2020), "The second decade of synthetic biology: 2010–2020", *Nature Communications*, 11(1):1-4.
- Porcar, M. y J. Peretó (2014), *Synthetic biology: from iGEM to the artificial cell*, Países Bajos, Springer.
- Zhu, R., J. M. del Río-Salgado, J. García-Ojalvo y M. B. Elowitz (2022), "Synthetic multistability in mammalian cells", *Science*, 375(6578):eabg9765.

Zubia Jocelyn Cisneros Ramos y Elsa Arellano Torres

# Microfósiles marinos para reconstruir el pasado del océano y el clima

Diminutos fósiles marinos nos ayudan a conocer las condiciones de los océanos y del clima del pasado. Asimismo, permiten hacer reconstrucciones de eventos muy relevantes en la historia de la Tierra, dado que brindan información específica sobre el ambiente en el que habitaron las especies biológicas en cada periodo.

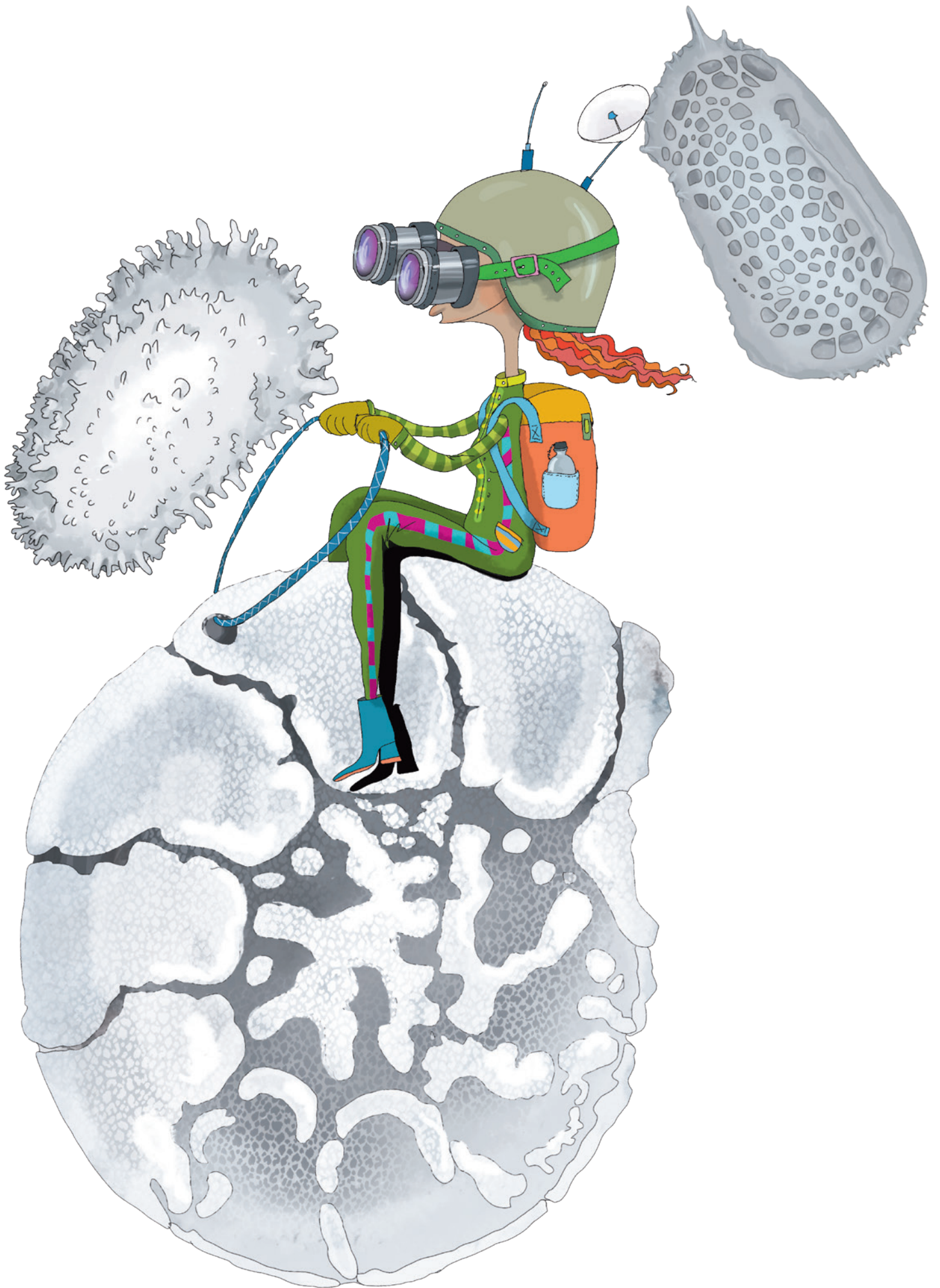
Los seres humanos tenemos un interés innato por preguntarnos acerca del pasado y los procesos naturales que dieron lugar a nuestro presente, de manera que en la ciencia se han desarrollado disciplinas, metodologías y herramientas para conseguir estas respuestas. Una de estas disciplinas es la paleoceanografía, que se dedica a estudiar y reconstruir las condiciones del océano a lo largo de la historia de la Tierra. Los microfósiles, una de sus herramientas, son restos de organismos microscópicos (caparazones u otras partes duras) que han quedado preservados en los sedimentos oceánicos. Mediante metodologías y técnicas especializadas, los microfósiles son útiles para reconstruir los paleoambientes y, con ello, conocer y estudiar la temporalidad de los estratos donde se depositaron.

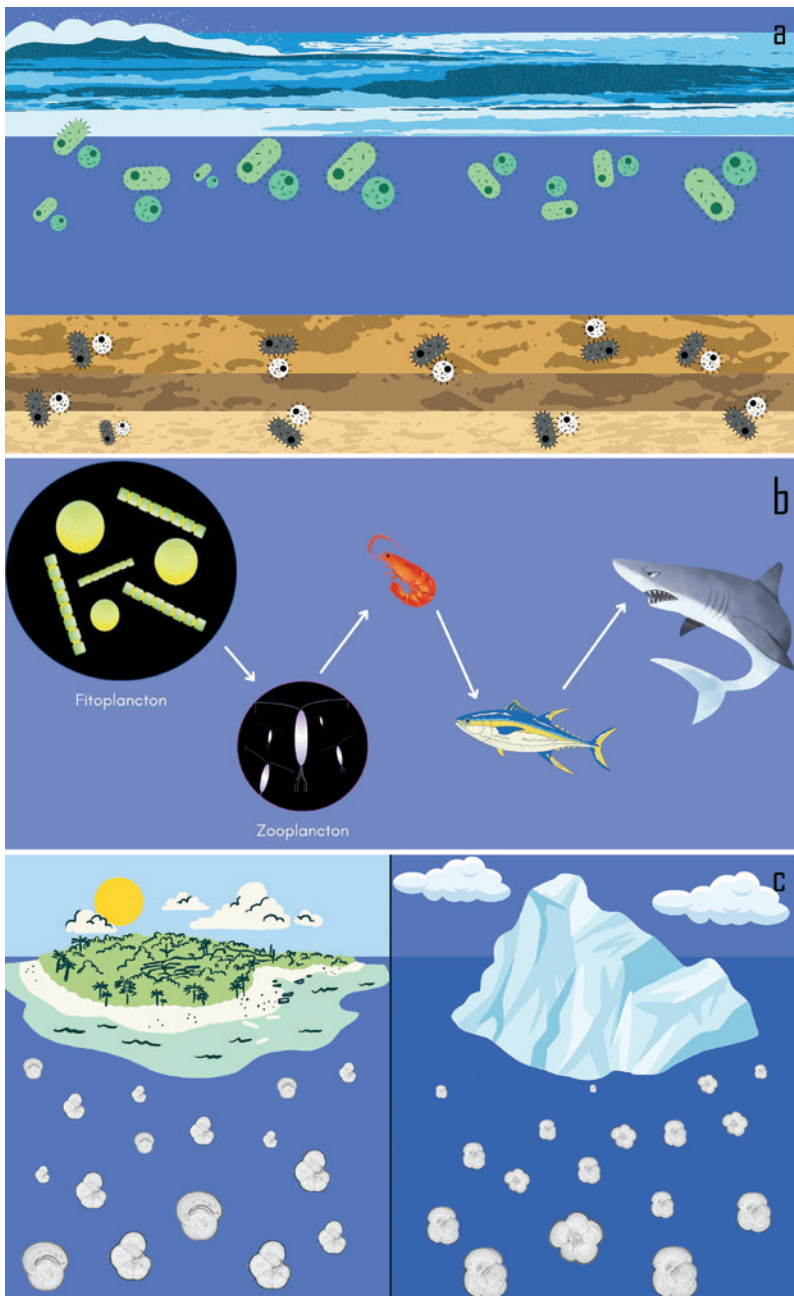
## Estudiar un mundo invisible

Por mucho tiempo la humanidad desconoció la existencia de los microfósiles, dado que son imperceptibles para nuestros sentidos. Entre los siglos XVI y XVII, la curiosidad por conocer y estudiar a organismos diminutos llevó a desarrollar y perfeccionar el microscopio moderno; en el siglo XIX surgieron diversas técnicas de microscopía para la caracterización de organismos y materiales; durante los siglos XX y XXI, la tecnología ha seguido avanzando para hacer los equipos cada día más accesibles y precisos; por ejemplo, para poder ver los microfósiles encontrados en los sedimentos oceánicos.

Pero, ¿por qué exactamente resultaría indispensable estudiar a los microfósiles para entender cómo eran los océanos en el pasado? Esta pregunta podría tener







**Figura 1.** Importancia de los microfósiles: a) primeras formas de vida y sedimentación; b) base de las redes tróficas; c) condiciones ambientales y cambios en sus comunidades.

varias respuestas, dependiendo del objetivo de cada investigación, pero aquí daremos tres razones generales (véase la Figura 1).

Primero, debido a que la vida surgió en los océanos y los microorganismos fueron los primeros seres vivos en poblar nuestro planeta. Con el paso del tiempo, continuaron evolucionando en otros más complejos; es decir, pasaron de ser células simples, a

crear complicadas estructuras de protección y sostén. Así, los restos de los organismos preservados en las múltiples capas de sedimentos nos ayudan a reconstruir la evolución de la vida en los océanos (véase la Figura 1a).

Asimismo, la aparición de productores primarios fotosintetizadores permitió que se generaran cadenas alimentarias que propiciaron diversas y complejas formas de vida (véase la Figura 1b). Por esta razón, al estudiar las abundancias y la distribución de los organismos que componen la base de las redes tróficas, podemos reconstruir la evolución de los ecosistemas marinos.

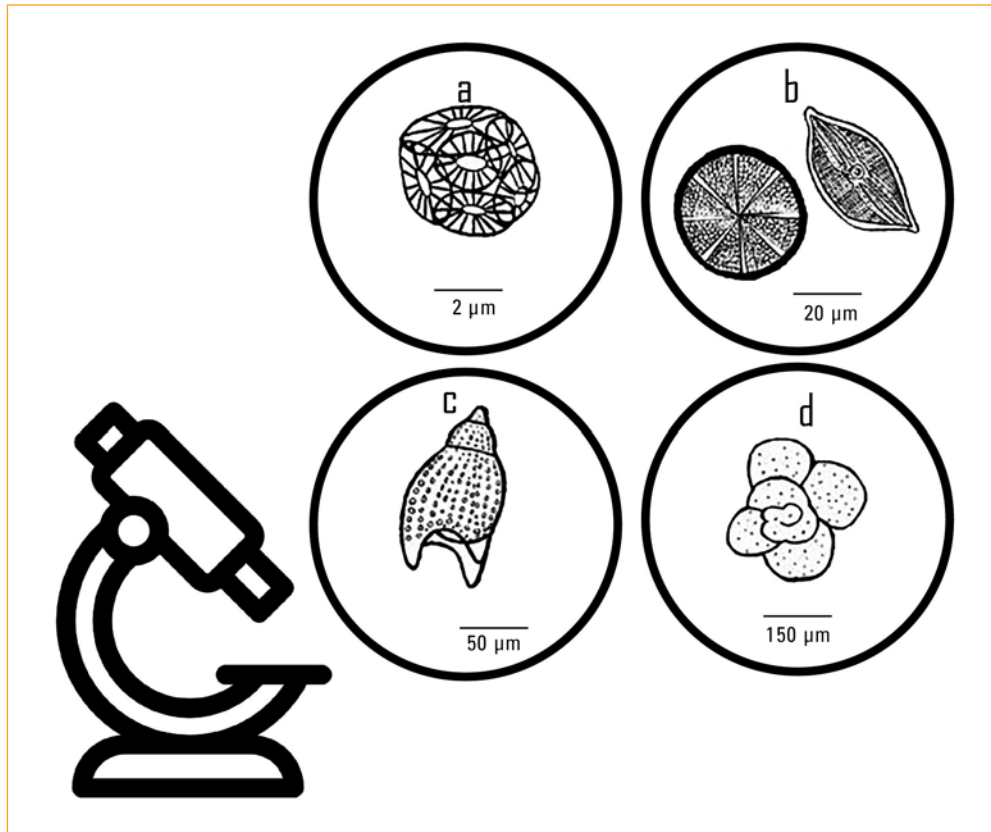
Por último, cabe considerar que los organismos cambian y se adaptan cuando las condiciones en la superficie del mar se ven afectadas por fluctuaciones en el clima. Estudiar los conjuntos de microfósiles y sus diferencias a lo largo del tiempo ayuda a reconstruir de forma indirecta las características del ambiente en que habitaron, como la temperatura, la productividad biológica o la intensidad de las corrientes (véase la Figura 1c).

Por lo tanto, la importancia de los microorganismos radica en que ellos mismos en incontables ocasiones han estado involucrados en reescribir la historia de la vida en el planeta. Precisamente, como dijo Louis Pasteur: “son los microbios los que tendrán la última palabra”.

### ■ El plancton marino

En el océano superficial, los microfósiles que cuentan dicha historia conforman el plancton marino, el cual es la base de las redes alimentarias por ser sumamente abundantes y fungir como un componente fundamental de los ciclos biogeoquímicos de carbono, nitrógeno, fósforo y silicio.

Por definición, la palabra *plancton* hace referencia a aquellos organismos que no tienen estructuras de locomoción y derivan o flotan en la columna de agua siendo transportados por las corrientes y las olas. Hay dos tipos: el fitoplancton y el zooplancton. Los primeros son organismos que viven en la superficie y llevan a cabo la fotosíntesis; es decir, son productores primarios y están encargados de producir entre



**Figura 2.** Microfósiles y componentes del plancton marino. Algas fotosintetizadoras, como: *a)* cocolitofóridos, con placas hechas de carbonato de calcio; y *b)* diatomeas, recubiertas de sílice. Protozoarios respiradores, como: *c)* radiolarios, con espinas hechas de sílice; y *d)* foraminíferos planctónicos, con cámaras hechas de carbonato de calcio.

50% y 80% del oxígeno que respiramos. Algunos organismos del fitoplancton son algas, entre las que encontramos cocolitofóridos y diatomeas (véanse las Figuras 2a y 2b). Por otro lado, el zooplancton está integrado por consumidores que son respiradores, representados por protozoarios y larvas de animales. Algunos protistas del zooplancton son los foraminíferos y los radiolarios (véanse las Figuras 2c y 2d). Curiosamente, los cuatro grupos de organismos que acabamos de mencionar son considerados microfósiles.

La distribución y la diversidad del plancton están condicionadas por las características del ambiente marino y los cambios de temperatura, luz, nutrientes, cantidad de alimento, circulación del mar, entre muchos otros factores. Dado que son muy sensibles a los cambios en su ambiente, esta misma sensibilidad hace que dichos organismos sean muy útiles como paleoindicadores de las condiciones de los océanos y el clima del pasado.

### Los microfósiles y un viaje en el tiempo

Si quisiéramos viajar al pasado para conocer las condiciones de la Tierra en un periodo determinado, tendríamos que usar una máquina del tiempo que, en este caso, no se trata de un aparato como los que vemos en las películas de ciencia ficción, sino que consiste en las señales y pistas que se quedan guardadas en las rocas y capas de sedimentos cuando mueren los organismos; de manera particular, estamos hablando de los microfósiles. En los sedimentos encontramos restos de estructuras duras, formadas de carbonato de calcio, sílice o materia orgánica, conocidas como testas, frústulas o quistes, dependiendo del organismo que estudiemos. Al ser recolectados, cuantificados y analizados, los restos revelan una gran variedad de información acerca de cómo era su entorno. Es decir, estas pistas ayudan a reconstruir escenarios del clima y los océanos del pasado.

Cada microfósil ofrece un tipo de información diferente, dependiendo del ambiente en el que

se desarrolló y habitó el organismo estudiado. Por ejemplo, si se quiere reconstruir la productividad primaria y el contenido de nutrientes en el ambiente marino, se puede hacer uso de algas como cocolitofóridos y diatomeas. Mientras que, si se busca reconstruir corrientes, temperatura y salinidad oceánicas, es mejor emplear protozoarios como radiolarios y foraminíferos. Lo anterior tiene que ver en gran medida con la composición química de sus estructuras y su nivel de sensibilidad a dichos parámetros.

¿Pero cómo aseguramos que ciertamente se reconstruya el pasado? Para ello, es importante que entendamos el presente lo mejor posible en términos de tendencias, procesos y fenómenos. Viendo los patrones que ocurren actualmente, se puede hacer una analogía con algún evento anterior, e incluso llegar a predecir el futuro por medio de modelos conceptuales o matemáticos.

#### ■ **Armamos el rompecabezas del clima**

■ Si alguna vez viste películas o series de detectives, te habrás percatado de que, para reconstruir la escena del crimen, siguen una serie de pasos: la observación de la escena, la colecta de la evidencia y el análisis por diversos especialistas. De manera similar, las personas que se dedican a la paleoceanografía estudian los océanos y climas del pasado. Lo primero que hacen es pensar en algún sitio de interés y preguntarse qué es lo que desean conocer o reconstruir de ese lugar; por ejemplo, hay quienes buscan reconstruir los cambios ocurridos en el nivel del mar, la abundancia y diversidad de especies, la productividad biológica, o bien las modificaciones en la intensidad y dirección de las corrientes.

Lo siguiente es investigar acerca del área de estudio, ya que es indispensable conocer el presente para entender el pasado, además de que lo que ocurre en la actualidad brinda una clara referencia o punto de partida. Después, se deben seleccionar los instrumentos, las herramientas y los métodos a utilizar para recolectar la evidencia.

Por ejemplo, para recuperar muestras o secuencias de sedimentos marinos, se extraen núcleos (columnas) de sedimentos cuya obtención requiere de

nucleadores o dragas. Estos tubos estrechos contienen material geológico muy fino, como arenas o lodos, entre los que vienen los microfósiles y el material biogénico que se ha acumulado durante mucho tiempo. De manera sorprendente, los núcleos marinos pueden ser tan cortos como pocos centímetros y tan largos como cientos de metros, todo depende de cuánto tiempo atrás se quiera “viajar en el tiempo”.

Una vez extraídos, los núcleos se llevan al laboratorio para analizarlos con instrumentos y equipos específicos, como diversos microscopios, espectrómetros de masas, analizadores elementales, entre otros, y así obtener los datos de interés. Más adelante, los resultados obtenidos son interpretados y comparados con estudios locales o regionales. Este último paso es el más complejo, pues los datos se ponen a prueba antes de darles un sentido robusto a las investigaciones. Cada evento paleoclimático que se reconstruye es en realidad un rompecabezas, cuya evidencia está formada por múltiples piezas, colocadas por múltiples investigaciones. A continuación, ejemplificamos una reconstrucción paleoceanográfica realizada con microfósiles encontrados en México, los cuales vivieron durante el evento paleoclimático conocido como Último Máximo Glacial.

#### ■ **El México del pasado**

■ El Último Máximo Glacial fue una época muy fría, aproximadamente hace 20 mil años, que persistió durante varios miles. Durante ese evento, los glaciares alcanzaron un tamaño tan grande que cubrieron el norte de Europa, Asia y Norteamérica. Aunque México no se cubrió de hielo, sí presentó características climáticas y oceánicas muy extremas, incluso opuestas a las que hoy conocemos. Los resultados de múltiples estudios en la región continental sugieren que durante el Último Máximo Glacial el clima en el sureste de nuestro país fue más frío y seco, a pesar de que hoy es una región húmeda y cálida.

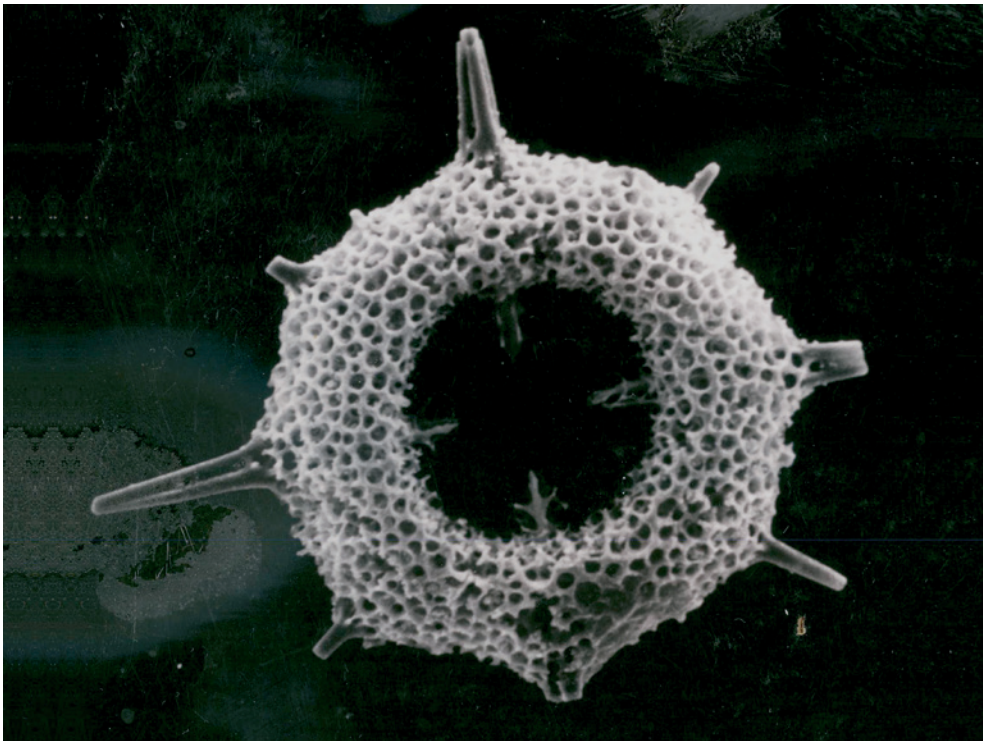
El clima de México, además de la radiación solar que recibe, está asociado a la Zona de Convergencia Intertropical, un cinturón de bajas presiones ubicado en la región ecuatorial, donde los vientos alisios convergen formando nubes y precipitaciones inten-

sas. Cuando este cinturón se desplaza hacia el norte y se ubica cerca de nuestro territorio, nos encontramos en la estación de lluvias, mientras que cuando se desplaza al sur, nos encontramos en la estación de secas. Por ello, hoy el clima del golfo de México se caracteriza por ser cálido-subhúmedo con lluvias en verano (junio a septiembre), vientos del norte en otoño e invierno (octubre a febrero) y una época de secas en primavera (febrero a mayo). El golfo de México tiene aguas cálidas que varían estacionalmente (entre invierno y verano) entre los 18 y 30 °C, con salinidades entre los 36 y 36.5 partes por mil. Los foraminíferos planctónicos que hoy viven en esta región son característicos de aguas oceánicas cálidas, poco productivas, con variaciones considerables en la salinidad, dada la alta evaporación y las zonas de descargas de ríos.

Ahora bien, en el golfo de México se han hecho estudios pioneros desde las décadas de 1970 y 1980 que iniciaron con la reconstrucción de las condiciones oceánicas del pasado (paleoceanográficas) del Último Máximo Glacial mediante microfósiles como foraminíferos planctónicos. Los foraminíferos son protistas del plancton cuyas conchas o esqueletos están hechos de carbonato de calcio. Con ellos se

ha logrado reconstruir la temperatura del mar o las corrientes oceánicas, para lo cual se han empleado diferentes metodologías geoquímicas, bioestratigráficas y paleoecológicas que proveen información indirecta acerca de los ambientes antiguos. Para las metodologías geoquímicas se analizan las conchas como un mineral, a partir de la información por la composición química de sus estructuras. En tanto, para el análisis bioestratigráfico (reconocimiento de estratos a través de sus fósiles) y paleoecológico (relación de los organismos fósiles con su ambiente) se requiere identificar a las especies. Tras conocer a las comunidades de organismos presentes en las capas de sedimento, se investiga su distribución, abundancia y ecología, para darles a los datos un sentido biológico.

¿Cómo fue el golfo de México durante el Último Máximo Glacial? A partir del reconocimiento de los conjuntos de especies que en él habitaban (véase la Figura 3), a la par de otros estudios, sabemos que las aguas superficiales fueron menos cálidas (aproximadamente de 1.5 a 2 °C más bajas), más salinas y densas de lo que son en la actualidad. La corriente principal del golfo, la corriente de Lazo, tuvo cambios en su intensidad. Aparentemente, la disminu-



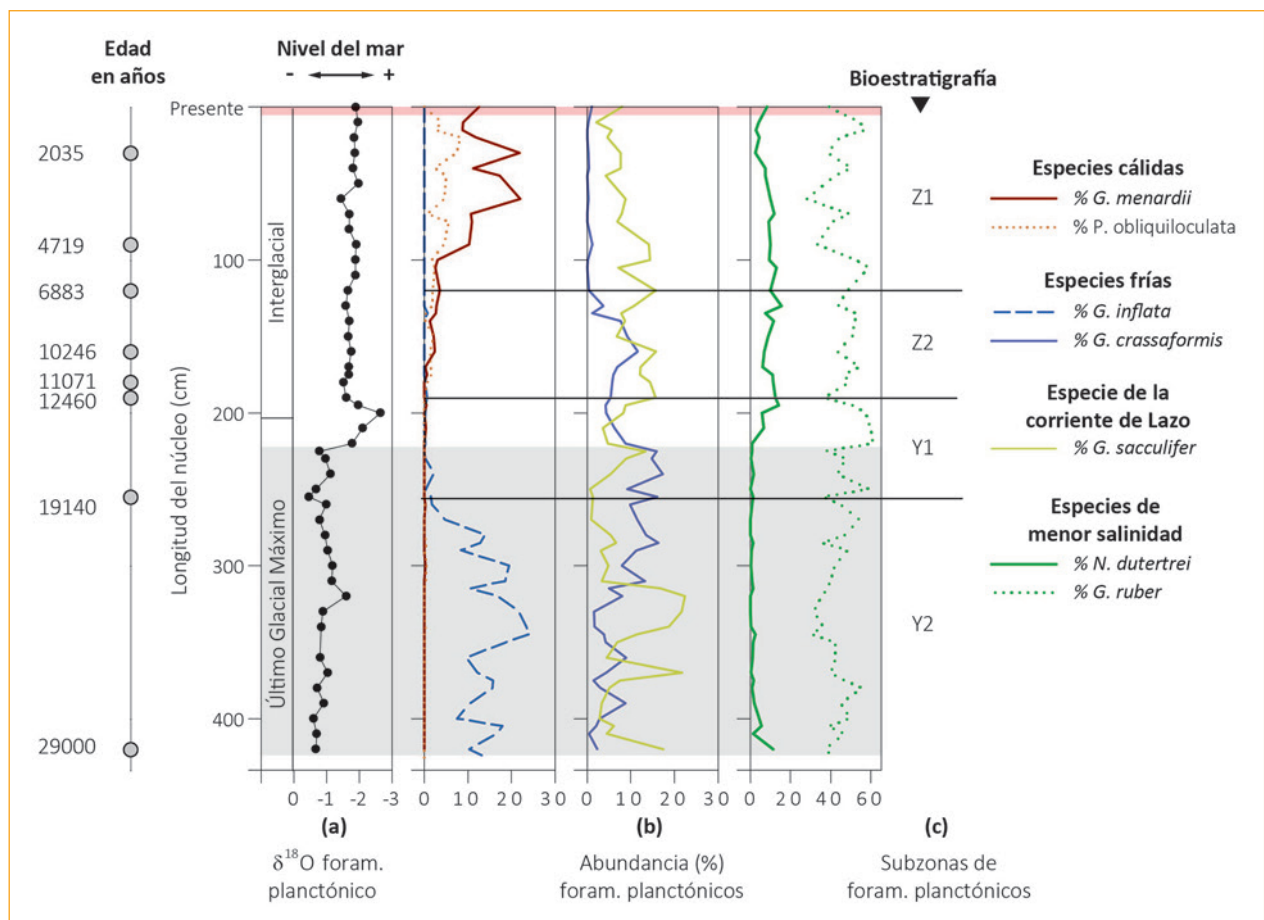
ción de la temperatura durante el Último Máximo Glacial parece no haber provocado muchos cambios, pero implicó que la cantidad de energía solar que recibía la Tierra fuera menor a la actual, y que la distribución de la radiación y el calor potenciaran cambios no sólo regionales sino globales. Para darnos una idea, durante el Último Máximo Glacial el hielo polar se acumuló tanto que el nivel del mar disminuyó entre 100 y 120 metros respecto al actual.

■ **El pasado como clave para entender el futuro**

■ Gracias a la sensibilidad del plancton marino ante los cambios en su ambiente, la paleoceanografía reconstruye escenarios oceánicos y climáticos centrados en eventos de hace miles de años. No obstante, los microfósiles del plancton son igual de útiles para conocer el presente como la historia de la Tierra, por-

que ayudan a comprender el impacto de un cambio climático. Hay factores que afectan la distribución espacial y abundancia de las especies, que asimismo se seguirán modificando con los climas extremos. En el futuro cercano, cada especie responderá de una manera distintiva, ya sea que llegue su extinción en los próximos años, o bien haya cambios en su distribución espacial y abundancia, como lo han hecho ya en otras épocas. De esta manera, el plancton seguirá quedando en el registro sedimentario como evidencia de que alguna vez estuvo presente, a partir de la información que brinda acerca del lugar al que una vez pertenecieron los microfósiles.

Y aunque todavía se desconoce mucha información del pasado, conforme más y más investigaciones suman sus interpretaciones, más detalles se obtienen para las diferentes regiones. Entonces, es así como las reconstrucciones oceánicas y climáticas del pasa-



**Figura 3.** Abundancia de foraminíferos planctónicos en el tiempo y su paleoecología. Análisis realizados en un núcleo de sedimento del golfo de México desde el Último Máximo Glacial (banda gris) hasta el presente (banda roja). Los puntos grises representan edades; la geoquímica ( $\delta^{18}O$ ) indica cambios en el nivel del mar; la bioestratigrafía (derecha) nombra subzonas (Y2 a Z1) conforme a especies indicadoras para cada estrato.

do nos permiten comprender mejor las interacciones entre los componentes del sistema climático. Y no sólo eso, también ayudan a entender y hacer proyecciones a futuro de posibles eventos que se pudieran repetir o parecerse a eventos pasados. Lo anterior es relevante para tomar las decisiones pertinentes y enfrentar, como naciones, los múltiples riesgos vinculados con el actual cambio climático.

#### **Zubia Jocelyn Cisneros Ramos**

Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.  
zubiakis@ciencias.unam.mx

#### **Elsa Arellano Torres**

Departamento de Ecología y Recursos Naturales, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.  
elsa\_arellano@ciencias.unam.mx

#### **Lecturas recomendadas**

- Arellano-Torres, E. y M. Machain-Castillo (2017), "Late Pleistocene-Holocene variability in the southern Gulf of Mexico surface waters based on planktonic foraminiferal assemblages", *Marine Microgeology*, 131: 44-58.
- Brunner, C. A. (1982), "Paleoceanography of surface waters in the Gulf of Mexico during the late Quaternary", *Quaternary Research*, 17(1):105-119.
- Daners, G. y M. Verde (2008), "Fósiles microscópicos", en D. Perea (ed.), *Fósiles de Uruguay* (pp. 1-47), Montevideo, DIRAC.
- Metcalf, S., S. O'Hara, M. Caballero y S. Davies (2000), "Records of Late Pleistocene-Holocene climatic change in Mexico a review", *Quaternary Science Reviews*, 19(7): 699-721.
- Shuman, B. (2014), "Approaches to Paleoclimate Reconstruction", D. Alderton y S. A. Elias, *Encyclopedia of Geology* (pp. 179-184), Oxford, Academic Press.

Aurelio Ramírez Hernández y Carmen María Estefanía Hernández Mota

# ¿Transparencia es igual a cristalinidad?

La transparencia y la cristalinidad son términos que empleamos en la vida cotidiana casi como si fueran iguales, pero en realidad son conceptos muy distintos desde el punto de vista de la ciencia, y de la física en particular. En este artículo pretendemos hacer notar una clara diferencia entre ambos a través de algunos ejemplos de su uso en el hogar, en la industria, en el universo y hasta en la política.

Muy probablemente hemos escuchado o dicho alguna vez: “¡Esta agua es muy cristalina!”, porque inconscientemente relacionamos lo transparente con lo cristalino, ¿pero esta aseveración es correcta? Para responder, primero debemos conocer los conceptos de *transparencia* y *cristalinidad* desde el punto de vista de la física, para luego contrastarlos a partir de algunos ejemplos que podemos encontrar alrededor nuestro.

## ■ ¿Qué es transparencia y qué es cristalinidad?

■ Cuando buscamos las definiciones en el diccionario de la Real Academia Española, encontramos que un material transparente es el que “permite ver los objetos con nitidez a través de él” (véase la Figura 1). En tanto, algo cristalino se distingue por ser “limpio, claro y transparente”. En este sentido, en el lenguaje cotidiano, estos adjetivos prácticamente son sinónimos.

No obstante, desde el punto de vista de la ciencia, cabe hacer algunas aclaraciones. Cuando decimos “material”, nos referimos a un compuesto, una sustancia o cualquier cosa que ocupa un lugar en el espacio. También podemos observar que entre los materiales transparentes y cristalinos existe aparentemente una conexión relacionada con la palabra “luz”, aunque no se menciona explícitamente en sus definiciones: para ver la transparencia de un material se necesita que la luz pase a través de él, y así poder distinguir si está limpio y claro. Desde la física, entendemos que la luz es aquello que hace visibles a los objetos, aunque este término es aún







Figura 1. La transparencia del agua.

más profundo: la luz es una onda electromagnética cuya periodicidad (la longitud de onda) es del orden de unas centenas de nanómetros (entre 400 y 800 nanómetros, aproximadamente).

En el caso de la transparencia, es necesario que la luz pase a través del material en cuestión; es decir, que se transmita por este medio. Esto tiene que ver con el tamaño de la longitud de onda de la luz: cuando la longitud de onda es muy grande (del orden de unos cientos de nanómetros para el caso de la luz visible), la onda se puede transmitir por ciertos materiales,

mientras que en otros se va a refractar (cambiará de dirección). Por otra parte, cuando la longitud de onda es muy pequeña (del orden menor de décimas de nanómetros), como en el caso de los rayos X, los materiales podrán refractar y esparcir este tipo de luz. Esto hace referencia a que un material tiene espacios o huecos por los cuales la luz puede pasar y, de esta manera, podremos apreciar con cierta nitidez los objetos, dependiendo principalmente del tamaño de los huecos.

El “hueco” es una forma de referirse a la distancia entre los átomos que están presentes en el material. Así, para que se transmita la luz, la longitud de onda deberá tener un tamaño menor que el del espacio o hueco dado. Por ejemplo, si alguien coloca un pedazo de tela frente a sus ojos, podrá ver lo que hay enfrente suyo dependiendo del tamaño de los huecos que tenga la tela (véase la Figura 2). En este caso, los huecos tienen un tamaño de milímetros, es decir, son mucho mayores que la longitud de onda de la luz visible. Otro ejemplo sería el de las persianas de una ventana: la cantidad de luz que entre o salga a través de la persiana será en función de la abertura que se deje.

En tanto, con “cristalinidad” en la ciencia nos referimos al ordenamiento en el espacio de los átomos de una sustancia o compuesto químico. Por ejemplo, algunos minerales, como la pirita o también llamada el “oro de los tontos” ( $\text{FeS}_2$ ), son materiales cristali-

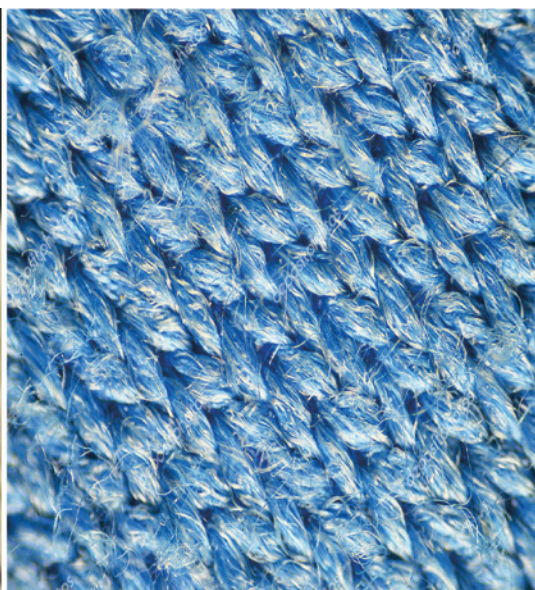


Figura 2. Huecos por donde pasa la luz.

nos, por el ordenamiento en el espacio de sus átomos. Cabe mencionar que los materiales no cristalinos no presentan una estructura definida u ordenada en el espacio, por lo que se les llama amorfos, como el vidrio (compuesto principalmente por arena o  $\text{SiO}_2$ ). Curiosamente, muchas personas cometen el error de llamar “cristales” a los vidrios.

Cuando se dice que un material es cristalino se quiere dar a entender que en su composición interna tiene cristales o está formada por cristales; es decir, este material presenta estructuras ordenadas en el espacio. El término (originado del latín *crystallus*) se refiere a un cuerpo geométrico con una cierta configuración espacial, esto es, que tiene una forma definida. El ejemplo más cercano que tenemos está en muchos de los alimentos que se elaboran para consumo humano y que contienen cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), mejor conocido como sal de mesa. Si ponemos un poco en la palma de nuestra mano y observamos fijamente, veremos que la sal está formada por pequeños cuerpos geométricos, cada uno con una forma definida y similar a los demás (véase la Figura 3). La forma geométrica de la sal es un poliedro regular de seis caras, esto es, formada por pequeños cubos, los cuales poseen una alta simetría; es decir, cada cubo se puede dividir varias veces en partes iguales, es posible rotar, reflejar, cambiar o invertir sus vértices y quedar en una posición indistinguible de la primera, lo cual se conoce como operaciones de simetría.

Cuando la luz incide o choca con alguna de las caras del cristal, se refracta y se esparce dependiendo de la forma geométrica, la composición química y el arreglo espacial de los átomos o moléculas del material. Por lo tanto, la capacidad de refractar y esparcir la luz es una característica propia o inherente de cada cristal. En el caso de la sal de mesa, la manera como se arreglan o se acomodan los elementos sodio y cloro (sus átomos) en el espacio para formar el  $\text{NaCl}$  le dan la configuración de cubo; esto es, los elementos se acomodan simétricamente en los vértices y las caras del poliedro. Cabe mencionar que cuando se quiere identificar el arreglo que siguen las moléculas o átomos de un cristal, se utilizan equipos instrumentales, como es el caso de los rayos X, para comparar su espectro o patrón de difracción con muchos otros cris-



Figura 3. Cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), mejor conocido como sal de mesa.

tales conocidos. Así, la palabra *cristalinidad* se refiere a algo que tiene un orden (simetría), pero también está relacionada con la luz, por el arreglo u ordenamiento geométrico que presentan los átomos y moléculas en el material y por el tamaño de la longitud de onda de luz que incide sobre éste.

#### ■ Usos de los cristales y la transparencia en la vida

■ Cualquiera podría pensar que los vidrios de las ventanas de las casas y edificios o incluso los pedazos de un vidrio roto son materiales cristalinos. De hecho, hay negocios o empresas que trabajan exclusivamente con vidrio y utilizan para la publicidad de

**Masa molar**  
 La cantidad de masa de una sustancia o compuesto químico que hay en un determinado número de partículas, llamado mol.

su negocio la palabra *crystal*. Sin embargo, la realidad es que los vidrios se elaboran a partir de la sílice (óxido de silicio,  $\text{SiO}_2$ ), mejor conocida como arena, que junto con otros materiales se llevan a fundición y en ese punto se enfrían rápidamente para obtener un material amorfo, es decir, sin orden interno o con una simetría prácticamente nula. Por lo tanto, un vidrio no es un cristal, pero sí puede ser un material transparente. Lo anterior implica que la transparencia depende también de otros fenómenos; por ejemplo, la refracción, esto es, el cambio de dirección de la luz al pasar de un medio a otro. A partir de lo anterior, podemos concluir que la expresión “¡Esta agua es muy cristalina!” es incorrecta; en cambio, podríamos decir “¡Esta agua es muy transparente!”, sí, como resultado de su índice de refracción.

En tanto, otro ejemplo distinto es el cuarzo (compuesto de sílice), que en algunas joyas u otros objetos tiene la apariencia de vidrio, pero en este caso no es amorfo, sino que es cristalino; es decir, presenta una estructura geométrica definida. Asimismo, las aspirinas que consumimos para disminuir un dolor de cabeza también están hechas de una sustancia cristalina, el ácido acetilsalicílico, que es un polvo no transparente, por lo que no observamos los cristales. De igual manera, la alúmina (óxido de aluminio, usado como esmeril para cortar vidrios), la cual se encuentra en la naturaleza en un mineral llamado corindón, también es un material cristalino, aunque no podamos observar sus cristales.

Pero en la actualidad muchos de los materiales que usamos en los hogares y en las industrias son plásticos. Estos polímeros son compuestos químicos de **masa molar** muy grande, comparada con las moléculas pequeñas como el agua y la sal de mesa. Los plásticos están hechos a partir de la unión repetitiva de un compuesto químico llamado monómero; sus uniones forman cadenas, las cuales pueden acomodarse de manera ordenada y desordenada. Esto último significa que los plásticos pueden ser cristalinos y transparentes a la vez; es decir, semicristalinos (véase la Figura 4).

En su configuración espacial, los materiales semicristalinos tienen una zona amorfa (desordenada) y una zona cristalina (ordenada). Cabe señalar que no hay polímeros 100% cristalinos, pero sí hay polímeros 100% amorfos. Para los científicos o las personas que trabajan con materiales poliméricos es muy importante definir si un plástico es semicristalino o amorfo, porque esta característica ayuda a proponer una posible aplicación de este material. Un error que comúnmente cometen los estudiantes de ciencias es concluir que todo polímero semicristalino es transparente. Por ejemplo, el polietileno de baja densidad es un material que solemos usar o ver en los centros comerciales, en la forma de las bolsas de plástico; este polímero, aunque tiene un alto porcentaje de zonas amorfas, es semicristalino y transparente. Por otra parte, el polietileno de alta densidad, usado en los chalecos antibalas, por ejemplo, aunque contiene un alto porcentaje de zonas cristalinas, es semicristalino y no es transparente.



Figura 4. Bolsa de plástico transparente.

### ¿El universo es cristalino o transparente?

Uno de los fundamentos de la teoría que explica que el universo se encuentra en expansión se erige en el concepto de *entropía*, definida como una medida del grado de desorden que presenta un sistema (ya sea cualquier parte o todo el objeto que se va a estudiar). De acuerdo con la teoría, el universo continúa expandiéndose porque su entropía está aumentando siempre (véase la Figura 5). La tercera ley de la termodinámica menciona que la entropía de un sistema tiende a cero (o se mantiene constante) cuando la temperatura absoluta tiende a cero; en otras palabras, esta ley quiere decir que un sistema alcanza su

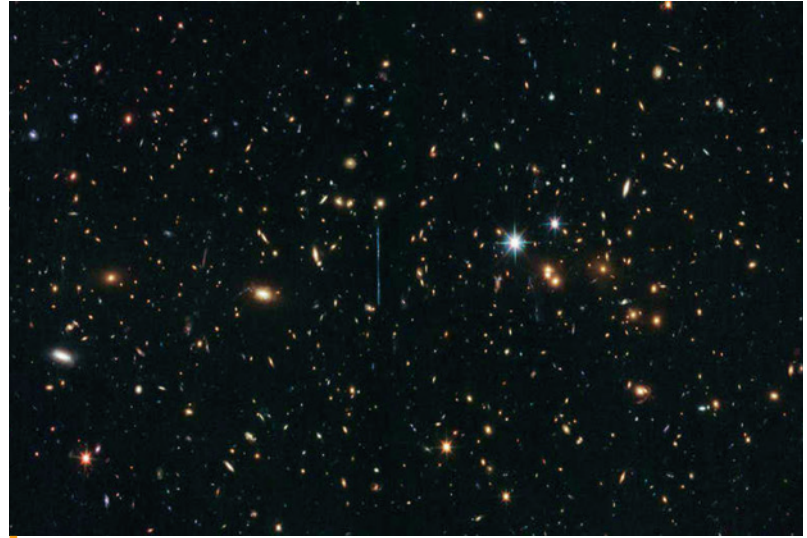
máximo orden cuando la entropía tiende a cero. Por lo tanto, si se dice que la entropía está aumentando (de acuerdo con esta teoría), significa que su orden está disminuyendo; es decir, su cristalinidad disminuye.

Por otro lado, si el universo está expandiéndose, significa que la distancia entre los cuerpos (estrellas, planetas, etc.) que hay en él está aumentando, por lo que la luz pasaría con mayor facilidad entre ellos. Esto quiere decir que la transparencia del universo se incrementa. Sin embargo, he aquí un dilema, porque claramente podemos observar el cristal de la sal de mesa en nuestra mano, pero estando sumergidos dentro del cristal, no es posible ver que se está dentro de un cristal. Esto es lo que pasa con el universo; por lo tanto, por el momento se tiene una limitación para comprender los términos de *transparencia* y *cristalinidad* en el caso del universo.

### ■ ¿Hay transparencia y cristalinidad en la política?

■ Hasta en la política suele escucharse o leerse que un gobierno debe ser transparente, y a la mayoría nos queda claro lo que se quiere decir con esta idea. Sin embargo, también se puede escuchar que un gobierno debe ser ordenado o cristalino en todos sus órganos o dependencias. Con esto se da a entender que los términos *transparencia* y *cristalinidad* funcionan como sinónimos. Pero, como ya vimos, estos conceptos no son empleados correctamente de esa manera.

¿Habrá algo que sea totalmente cristalino y totalmente transparente? La respuesta desde la ciencia es que en la naturaleza no hay un material, sustancia o compuesto que sea 100% cristalino y 100% transpa-



■ **Figura 5.** La transparencia del universo.

rente a la vez. Por ello, si queremos usar estos términos en la política, podemos intuir que tampoco puede haber un gobierno transparente y cristalino al mismo tiempo.

#### Aurelio Ramírez Hernández

Universidad del Papaloapan, campus Tuxtepec.  
chino\_rah@hotmail.com

#### Carmen María Estefanía Hernández Mota

Universidad del Papaloapan, Campus Tuxtepec.  
sttefa\_mottta@hotmail.es

#### Referencia

Reyes Melo M. E. y M. Hinojosa Rivera (2000), "Estructura del estado sólido", *Ingenierías*, 3(9):7-14.

Jocelyn Ángel Gutiérrez y Claudia Mabel Munguía Méndez



# Cloroplastos: modificación genética más allá del núcleo

La ingeniería genética es de gran utilidad en la industria farmacéutica y agroalimentaria para sintetizar moléculas de interés a gran escala y bajo costo. Mediante biofábricas, con ayuda de varios organismos, es posible alterar el genoma de los cloroplastos en las células vegetales para modificar plantas como biorreactores, vacunas comestibles, enzimas, biomateriales y biocombustibles, entre otros.

## Introducción

La modificación genética cobra cada vez más relevancia para la ciencia debido a que sirve para insertar, eliminar o editar algún fragmento del ADN en los genes de un organismo. Asimismo, permite transferir genes de un individuo a otro, para conferirle características de interés al receptor. Los organismos susceptibles de ser modificados genéticamente incluyen a plantas, hongos, animales y bacterias.

Para llevar a cabo una modificación de este tipo se utiliza un conjunto de técnicas de ingeniería genética a nivel molecular. En el caso particular de las plantas, lo anterior posibilita la producción de sustancias (proteínas) de interés biotecnológico que incluso podrían tener aplicaciones farmacéuticas o permitir que estos organismos adquieran resistencia a los herbicidas. Además, debido a que las plantas se pueden modificar de una manera más eficiente que otros organismos, se ha propuesto utilizarlas a manera de vacunas comestibles; es decir, que los frutos o vegetales tengan los compuestos necesarios para prevenir enfermedades en aquellas poblaciones que no tienen acceso a las vacunas convencionales. Otra de las propuestas es enriquecerlas con vitaminas y minerales que puedan nutrir a las personas.

## Modificación genética de cloroplastos

Por lo general, la modificación genética ocurre en los cromosomas del genoma del núcleo, para que la célula produzca las proteínas deseadas. Sin embargo, el



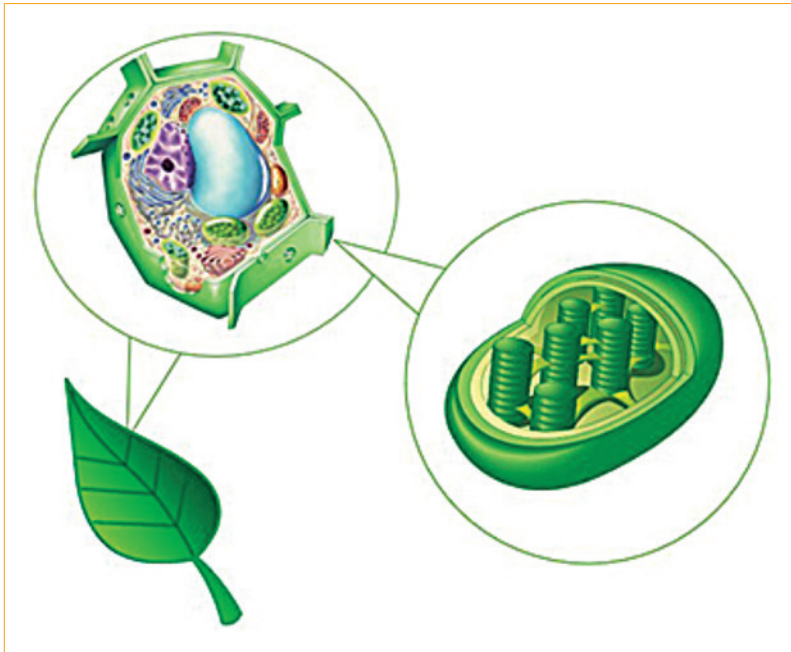


Figura 1. Representación de un cloroplasto en una célula vegetal.

núcleo no es el único organelo que contiene ADN en su estructura: se tienen además las mitocondrias y los cloroplastos. En algunos organismos eucariotas, los cloroplastos son los organelos celulares en los cuales ocurre la fotosíntesis (véase la Figura 1) y se produce la clorofila, que le confiere la tonalidad verde a las plantas. Sin los cloroplastos, las plantas no podrían ser organismos autótrofos; es decir, no podrían generar su propio alimento (glucosa) a partir de luz solar (fotones), agua y dióxido de carbono.

En la actualidad, y desde hace más de dos décadas, se utiliza la técnica de biobalística para modificar el genoma de los cloroplastos en las plantas, aunque hay diversas patentes que limitan su uso. Básicamente, esta técnica funciona mediante disparos de nanopartículas de oro recubiertas por el gen de interés. Asimismo, se tiene el beneficio de que el producto deseado solamente se fabrica en los cloroplastos, por lo que es posible sintetizar proteínas o compuestos que de otra manera serían tóxicos para la célula y, por ende, para la planta.

La obtención de altas concentraciones de proteínas de interés en el menor tiempo posible es indispensable para la industria. Para ello, los cloroplastos tienen un gran atractivo, porque cada célula vegetal contiene aproximadamente 100 cloroplastos, a

diferencia del núcleo (pues solamente hay uno en cada célula). Esto indica que, después de realizar una modificación genética en los cloroplastos, se pueden generar hasta 10 000 copias del gen insertado y, por consiguiente, se obtiene una alta concentración de la proteína de interés en los cloroplastos.

### ■ Aplicaciones recientes

■ En 2010, Jana Řepková identificó los posibles beneficios económicos y agrícolas como consecuencia de modificar genéticamente a los cloroplastos. Algunos de éstos ya se han visto en la práctica e incluyen la resistencia a herbicidas o insectos y la tolerancia a climas extremos, como sequías. A la fecha, esta técnica se ha empleado con resultados exitosos en cultivos de gran interés comercial, tales como algodón, maíz, papa, tomate, remolacha y trigo, para conferir resistencia a herbicidas.

Por otra parte, como se mencionó líneas arriba, los cloroplastos contienen su propio ADN, el cual puede ser modificado genéticamente para utilizar a las plantas como biofábricas o biorreactores, útiles para la producción de vacunas, enzimas, biomateriales y biocombustibles, entre otras aplicaciones, y no sólo para mejorar sus características agronómicas o para permitir la absorción de contaminantes (fitorremediación). Con respecto a la producción de proteínas con efectos terapéuticos, se identifican varias ventajas, tales como la obtención de los compuestos a un bajo costo y el hecho de que la eficacia de la proteína no se ve afectada por el tiempo que pase en almacenamiento. En 2014, Alma Lorena Almaraz-Delgado y cols. modificaron el genoma de los cloroplastos de la planta de tabaco para que produjera la proteína E7 HPV tipo 16, como un buen prospecto hacia la creación de una vacuna para prevenir el cáncer.

### ■ Implicaciones a futuro

■ Se cree que gracias a la producción de biofármacos a partir de la modificación genética en los cloroplastos será posible producir fármacos comestibles. Lo anterior podría permitir que más personas tengan



acceso a medicamentos de una manera sencilla e incluso menos costosa, al consumir directamente los frutos de la planta.

En cuanto al posible impacto ecológico, cabe considerar que el genoma cloroplástico se hereda por línea materna, lo que evita que los genes puedan ser distribuidos al ambiente por medio del polen y, por consecuencia, no hay contaminación por genes modificados en plantas y ecosistemas silvestres. Sin embargo, se presenta el inconveniente de que el genoma bacteriano tiene similitud con el genoma cloroplástico, lo cual podría resultar en una transferencia del material genético insertado a otro organismo.

Con respecto a las implicaciones éticas, los cambios genéticos realizados en los genomas cloroplásticos deberían estar dirigidos a generar mejoras para beneficio de la sociedad. También deben hacerse en condiciones controladas y siguiendo los protocolos establecidos por las organizaciones correspondientes.

La variedad de aplicaciones que la ingeniería genética presenta en la actualidad la convierte en uno de los principales campos de enfoque para la resolución de problemas en la industria. La modificación del genoma en los cloroplastos presenta una importante alternativa frente a la modificación del núcleo, debido a sus beneficios económicos, ambientales y éticos.

#### Jocelyn Ángel Gutiérrez

Tecnológico de Monterrey.  
jociangelgu@gmail.com

#### Claudia Mabel Munguía Méndez

Tecnológico de Monterrey.  
claudiamm98@hotmail.com

#### Lecturas recomendadas

- Adem, M, D. Beyene y T. Feyissa (2017), "Recent achievements obtained by chloroplast transformation", *Plant Methods*, 13(1):1-11. Disponible en: <doi.org/10.1186/s13007-017-0179-1>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Almaraz-Delgado, A. L., J. Flores-Urbe, V. H. Pérez-España, E. Salgado-Manjarrez y J. A. Badillo-Corona (2014), "Production of therapeutic proteins in the chloroplast of *Chlamydomonas reinhardtii*", *AMB Express*, 4:57. Disponible en: <doi.org/10.1186/s13568-014-0057-4>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Bock, R. (2014), "Genetic engineering of the chloroplast: novel tools and new applications", *Current Opinion in Biotechnology*, 26:7-13. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.copbio.2013.06.004>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Daniell, H., S. Kumar y N. Dufourmantel (2005), "Breakthrough in chloroplast genetic engineering of agronomically important crops", *Trends in Biotechnology*, 23(5):238-245. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.tibtech.2005.03.008>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Daniell, H., M. S. Khan y L. Allison (2002), "Milestones in chloroplast genetic engineering: an environmentally friendly era in biotechnology", *Trends in Plant Science*, 7(2):84-91. Disponible en: <doi.org/10.1016/s1360-1385(01)02193-8>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Fernández Perrino, F. J. (2006), "Vegetales transgénicos: mitos y realidades desde una perspectiva técnica", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29(2):95-102. Disponible en: <www.redalyc.org/articulo.oa?id=61029201>, consultado el 12 de mayo de 2023.
- Řepková, J. (2010), "Potential of chloroplast genome in plant breeding", *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding*, 46(3):103-113. Disponible en: <doi.org/10.17221/79/2010-CJGPB>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Segretín, M. E., S. A. Wirth y F. Bravo-Almonacid (2004), "La transformación de cloroplastos", *Academia Nacional de Agronomía y Veterinaria*, LVIII: 358-370. Disponible en: <sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/29395>, consultado el 16 de agosto de 2021.
- Yu, Y., P. C. Yu, W. J. Chang, K. Yu y C. S. Lin (2020), "Plastid transformation: How does it work? Can it be applied to crops? What can it offer?", *International Journal of Molecular Sciences*, 21(14):1-21. Disponible en: <doi.org/10.3390/ijms21144854>, consultado el 16 de agosto de 2021.

# El chile (*Capsicum*) como objeto jurídico<sup>1</sup>

Las variedades vegetales pueden definirse como objetos jurídicos a partir de diversos elementos vinculados con el derecho. Este artículo analiza las variedades del chile en tanto objetos físicos; su cultivo y producción; los usos industriales de su material biológico; las modificaciones a su material genético, así como su protección respecto de los usos tradicionales y las denominaciones de origen de sus especies.

Son pocas las especies vegetales que se presumen tan representativas de México como el chile. Durante el largo proceso de construcción nacional, diversas variedades se han considerado símbolos de la identidad culinaria y cultural del país. Sin embargo, corresponde al derecho regular una serie de aspectos vinculados con él, como puede ser su catalogación, cultivo, producción, distribución, propiedad o protección. Para entender las distintas maneras de regulación relacionadas con el chile, es necesario conceptualizar jurídicamente al género vegetal *Capsicum*, de conformidad con las normas previstas en diversos ordenamientos nacionales e internacionales.

En tanto objetos físicos, los chiles pueden considerarse bienes muebles o inmuebles dependiendo de las condiciones físicas en que se encuentren. Si se está ante un fruto desprendido de su planta, podría considerarse un bien mueble. En contraste, si los frutos del chile se encuentran en un campo de cultivo o unidos a la rama de su planta, serían considerados bienes inmuebles. Esta distinción importa, pues los efectos jurídicos serán diferentes en cada caso concreto que se presente.

Para el derecho civil, los chiles en lo individual o como conjunto pueden ser objeto de propiedad. También pueden estar considerados en el usufructo que se otorgue sobre un bien inmueble. Los campos de cultivo de estas especies pueden ser objeto de arrendamiento. Los chiles pueden ser materia de un contrato. La destrucción de los chiles o de los campos de cultivo puede motivar daños o perjuicios y, conforme a ello, el pago de las correspondientes indemnizaciones.

<sup>1</sup> Una primera versión de este texto se presentó en el simposio “*Capsicum*. El chile: ciencia y cultura”, celebrado en El Colegio Nacional, el 26 de marzo de 2015. Agradezco a Yadira García Montero y a Pedro Rubio Cordero su apoyo en la elaboración de esta versión escrita.



En materia penal, podría darse el caso de que se configuraran delitos tipificados en los códigos, tanto federal como estatales. Tal es el caso del robo, el daño en propiedad ajena –por destrucción de las plantas de chile– o el despojo de un bien inmueble en el que las plantas se encuentren sembradas o los chiles estén almacenados. El tipo de delitos y el monto de las penas que les corresponderán podrán variar dependiendo de las condiciones de estos bienes. Por ejemplo, será distinto si tienen el carácter de bienes muebles –chiles separados de la planta– o inmuebles –si están adheridos a ella–.

■ **Respecto a las variedades de chile**

Las variedades de especies del género *Capsicum* pueden tener otras formas de regulación jurídica en nuestro país; una de ellas es como recurso vegetal. Mediante la Ley Federal de Sanidad Vegetal, se resguarda la integridad biológica de las especies vegetales y se prevén las condiciones fitosanitarias que éstas deben guardar. Además, el Servicio Nacional de Inspección y Certificación de Semillas mantiene el Catálogo Nacional de Variedades Vegetales con el objetivo de registrar las características biológicas de las especies presentes en el territorio mexicano. Para lograr el registro de una variedad específica es necesario acreditar que es distinta a otras; la persona física o moral que mediante un proceso de mejoramiento haya obtenido y desarrollado una nueva variedad vegetal, de cualquier género y especie, reconocible homogeneidad, tendrá derechos de explotación por 15 años. Esto es aplicable únicamente a las especies obtenidas mediante procesos de mejora con injertos u otros métodos biológicos que no impliquen la manipulación del material genético. Si esto último ocurre, la regulación corresponde a la Ley de Bioseguridad de Organismos Genéticamente Modificados.

De las diferentes variedades de chile se puede extraer una sustancia llamada capsaicina, la cual tiene varios usos tecnológicos e industriales gracias a su composición y particularidades químicas y biológicas. En este sentido, hay diversas disposiciones jurídicas relacionadas con los productos derivados del chile y las sustancias de las que se compone, así



como al respecto de la protección de los derechos de uso y explotación por medio de patentes. Por ejemplo, pueden generarse derechos en favor de quienes logren producir innovaciones con la capsaicina, pero no podrán obtener titularidad de la especie empleada. Al respecto hay tres ejemplos que son particularmente ilustrativos: 1) innovaciones en el campo farmacéutico, como sucede con algunos analgésicos tópicos; 2) prototipos de gas pimienta u otros instrumentos de defensa personal generados a partir de las propiedades irritantes de distintas variedades de chiles; 3) mezclas de un polvo que tiene como base el chile y se usa para el recubrimiento plástico de varios tipos de cables. Lo que la legislación finalmente prevé es la posibilidad de ser titular de algunas mezclas o compuestos generados a partir de las sustancias presentes en cualquiera de las variedades de chile por medio de las patentes previstas en la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial (LFPI). Lo que no es posible es obtener la titularidad o patente sobre una variedad vegetal o sobre los procesos esencialmente biológicos de obtención de vegetales.

Una manera diversa de protección jurídica de las variedades vegetales o de la propiedad industrial derivada de sus procesos productivos es la relacionada con las maneras tradicionales en las que las comunidades indígenas utilizan determinados recursos naturales. Desde diciembre de 1993, México es parte del Convenio sobre la Diversidad Biológica de las Naciones Unidas, en el cual se establece la obligación de respetar y preservar los conocimientos, las innovaciones y las prácticas de las comunidades tra-

dicionales pertinentes para la conservación y el uso sostenible de la diversidad biológica.

### Denominación de origen

Otra figura jurídica relacionada con las variedades vegetales es la llamada denominación de origen, la cual sirve para proteger un

producto vinculado a una zona geográfica de la cual éste es originario, siempre y cuando su calidad, características o reputación se deban exclusiva o esencialmente al origen geográfico de las materias primas, los procesos de producción, así como los factores naturales y culturales que inciden en el mismo (LFPPI, 2020, art. 264).

A pesar de que este reconocimiento no es exclusivo para especies biológicas, diversos frutos y productos de origen vegetal pueden disfrutar de la protección. De hecho, de las 18 denominaciones de origen mexicanas, 9 corresponden a especies vegetales; de entre ellas, 2 tipos de chile tienen esa figura: el chile habanero (*Capsicum chinense*) de la Península de Yucatán y el chile de árbol Yahualica (*Capsicum annum*) de los Altos de Jalisco.

De conformidad con la LFPPI, para obtener una denominación de origen se debe presentar una solicitud ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) que incluya una descripción detallada

del producto, sus características técnicas de elaboración, la delimitación de la zona geográfica en que se produce, las normas oficiales mexicanas a las que debe sujetarse para su producción, entre otros aspectos. Con base en lo anterior, el IMPI examina los datos proporcionados para dar una respuesta oficial en un plazo no mayor a seis meses, la cual deberá publicarse mediante una declaratoria en el *Diario Oficial de la Federación* (DOF). Enseguida se inicia un periodo de dos meses para oposiciones u objeciones por parte de terceros, en cuyo caso se revisa la solicitud de denominación de origen y se resuelve si se concede o no esta protección al producto determinado. Si se otorga la denominación de origen, sus efectos duran 10 años desde la fecha de presentación de la solicitud y pueden renovarse por periodos iguales.

Este proceso ocurrió con motivo de la solicitud presentada en 2006 por una asociación civil para obtener y atribuir al estado de Yucatán la denominación de origen del chile habanero. Como lo indica la regulación, el 17 de octubre de 2007 se publicó en el DOF un extracto de la solicitud y se abrió un periodo para oposiciones u objeciones, durante el cual los gobiernos de Quintana Roo y de Campeche declararon su inconformidad y expresaron su voluntad de incluir a sus productos en el régimen de protección de la denominación de origen que se había solicitado; es decir, buscaron ampliar su alcance a toda la Península.





No obstante, el 10 de octubre de 2008 el IMPI publicó en el DOF la respectiva declaratoria de protección de la denominación de origen para el chile habanero (*Capsicum chinense*) que se produjera únicamente en el estado de Yucatán. A raíz de esto, surgió una controversia constitucional promovida por el titular del gobierno de Quintana Roo en contra del director del IMPI. Este caso se admitió en la Suprema Corte de Justicia de la Nación (SCJN) y, como resultado, Campeche se adhirió a la controversia al verse afectado por la decisión de la SCJN. En vista de que las partes habían acordado previamente incluir a los tres estados de la Península en la denominación de origen y de que se había invalidado la declaratoria del 10 de octubre de 2008 que sólo atribuía la protección al estado de Yucatán, la parte actora se desistió de su petición ante la SCJN y el juicio se sobreseyó. Después de diversas vicisitudes procesales, en junio de 2010 el IMPI publicó la declaratoria de la denominación de origen que incluyó a los tres estados de la Península de Yucatán.

#### ■ ■ ■ **Conclusión**

■ Las variedades vegetales pueden definirse como objetos jurídicos desde distintos ordenamientos y, desde luego, con diferentes efectos jurídicos. Además de sus numerosas posibilidades de conceptualización jurídica, las muy diversas especies del género *Capsicum* pueden adquirir distintos tipos de protección en relación con su lugar de origen, proceso de producción o propiedad industrial.

Cabe hacer notar la enorme relevancia de las diversas variedades de chile, no solamente en términos del beneficio económico que aporta su producción, o bien con respecto a la identidad cultural y gastronómica de muchas regiones del país, sino también en cuanto a la innovación industrial. Por esta razón, es importante tomar en consideración los marcos jurídicos que pueden aplicarse para la protección de las especies de chile en México sobre la obtención de variantes vegetales nuevas; los derechos de propiedad industrial que pueden surgir de las innovaciones que se hagan respecto a ellas; los usos tradicionales de

sus plantas y frutos; así como las denominaciones de origen que pueden recibir sus variedades.

En esta breve contribución me he limitado a señalar algunos aspectos jurídicos generales vinculados con el chile, entendido como un género vegetal con muy diversas posibilidades materiales, biológicas, físicas y químicas. Lo único que he pretendido es llamar la atención para que las personas que se dedican a otras disciplinas sepan que sus investigaciones –como tantas otras cosas en la vida– también pueden llegar a tener vinculaciones relevantes con el derecho.

### José Ramón Cossío Díaz

Ministro en retiro, profesor en El Colegio de México.

[jrcossio@colmex.mx](mailto:jrcossio@colmex.mx)

### Referencias específicas

Declaratoria General de Protección de la Denominación de Origen “Chile Habanero de Yucatán” (2008), *Diario Oficial de la Federación*, 10 de octubre.

Declaratoria General de Protección de la Denominación de Origen “Chile Habanero de la Península de Yucatán” (2010), *Diario Oficial de la Federación*, 4 de junio.

Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial (LF-PI) (2020), *Diario Oficial de la Federación*, 1 de julio.



Itzel Elizalde Rodríguez, Dianareli Hernández H. y Eugenia Silva-Herzog

# El microbioma humano en la coyuntura entre la salud y la enfermedad

Nuestro cuerpo está compuesto tanto de células humanas como de miles de microorganismos (microbiota) que lo cohabitan, casi en una proporción de 1 a 1 con nuestras células; es decir, somos mitad bacterias y mitad humanos. En la última década se ha estudiado el papel central del microbioma humano en el metabolismo y funcionamiento habitual del cuerpo, así como en el balance entre salud y enfermedad.

## ■ Introducción

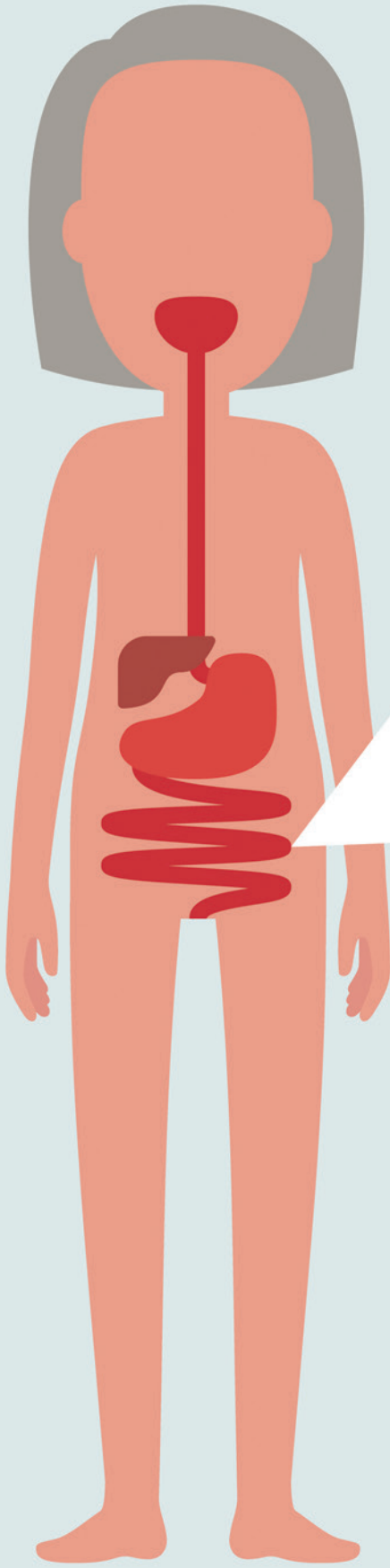
■ El concepto de enfermedad, e incluso el de salud, ha ido variando en el transcurso de la historia de la humanidad (Volcy, 2007). En el siglo XIX Louis Pasteur y Robert Koch establecieron la teoría de los gérmenes o teoría microbiana de la enfermedad, que atribuye la causa de las enfermedades infecciosas a la presencia de un microorganismo patógeno y no al “miasma” o aire fétido que era común en las épocas anteriores, cuando no había drenaje, agua corriente ni otras medidas de salud pública. En la actualidad, el uso de nuevas tecnologías ha enriquecido y reformulado los conceptos de salud y enfermedad; hoy sabemos que las distintas patologías que afectan al ser humano pueden ser causadas por microorganismos, así como por mutaciones o defectos moleculares, e inclusive por la interacción con el ambiente.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) ha propuesto el concepto de Una Salud para integrar la salud humana, la de otras especies animales y la del entorno natural en un solo ideal de salud. Más aún, la secuenciación genómica de nueva generación ha demostrado que el cuerpo humano incluye microorganismos comensales o microbiota que son fundamentales para la salud del individuo. De esta forma, el concepto de salud debe considerar tanto la interacción con el ambiente externo como con los microorganismos que cohabitan en el cuerpo.

## ■ Microbioma y microbiota

■ En 1988, John Whipps, Karen Lewis y Rod Cooke sugirieron por primera vez el concepto de microbioma con base en estudios de enfermedades en plantas. Ellos lo





definieron como la comunidad de microorganismos vivos presentes en un hospedero: bacterias, arqueas, hongos, protozoarios y virus, junto con su “escenario de actividad”; esto es, los metabolitos, moléculas de señalización y elementos estructurales producidos tanto por los microorganismos como por el hospedero. De esta forma, en el cuerpo humano como hospedero, el microbioma es el ecosistema interno constituido tanto por las células humanas como por los microorganismos que en él conviven, casi en una proporción de 1 a 1; es decir, somos 50% microbios.

Se estima que más de  $10^{14}$  microorganismos coexisten en el cuerpo humano, los cuales por lo general no son perjudiciales, sino que forman parte de la fisiología normal del organismo. Al conjunto de estos microorganismos se le conoce como microbiota, y al conjunto de los genes de estas microbiotas se le denomina metagenoma. Tanto la microbiota como el metagenoma pueden modular las funciones y capacidades metabólicas e inmunológicas del hospedero (Hernández y Bobadilla, 2017).

En las últimas décadas, las técnicas independientes de cultivo de estos microorganismos han resaltado la importancia de la microbiota para el balance entre salud y enfermedad en el cuerpo humano. La investigación del microbioma humano mediante la secuenciación masiva empezó a partir de dos grandes proyectos: el proyecto MetaHit (Metagenomics of the Human Intestinal Tract) de la Unión Europea y el Human Microbiome Project (HMP) de Estados Unidos de América. Este último formalizó el estudio del microbioma en el contexto de la salud y la enfermedad, centrándose en caracterizar las comunidades microbianas en diferentes sitios del cuerpo humano: conductos nasales, cavidad oral, piel, tracto gastrointestinal y tracto urogenital.

Recientemente se ha propuesto que el microbioma desempeña un rol esencial en la adecuada actividad del organismo, no sólo por su participación en las funciones metabólicas, sino también por su comunicación con el sistema nervioso, el sistema hormonal, el sistema inmunológico, y así como con los diferentes microbiomas del cuerpo. En conjunto, todas estas interacciones determinan el balance entre salud y enfermedad en el hospedero.

### ■ ■ ■ El microbioma es dinámico

■ El microbioma es un sistema dinámico que ha evolucionado junto con la especie humana y que sigue adaptándose durante la vida de cada individuo. Su composición depende de la vía de nacimiento (vaginal o cesárea), del tipo de alimentación durante y después de la etapa de lactancia (leche materna o fórmula, alta en fibra o en grasas, etc.), así como de otros factores, como género, hábitos de higiene, uso de antibióticos, índice de masa corporal, nivel de actividad física, además del lugar geográfico donde vive (a nivel del mar o en la cima de las montañas, en una zona urbana o rural, entre otros).

El nacimiento es el primer escenario de exposición a las bacterias y donde comienza a hacerse una distinción entre aquellas que predominan en el neonato. Por ejemplo, la microbiota intestinal de los bebés que nacen por cesárea tiene una mayor proporción de especies, como *Bacteroides* spp., *Escherichia-Shigella* y *Clostridium difficile*; en cambio, en los niños nacidos por parto vaginal, los géneros dominantes son *Bifidobacterium*, *Clostridium* y *Bacteroides*. Diversos estudios han demostrado que las bacterias presentes en recién nacidos son similares a las que posee la madre; sin embargo, también han señalado la variación de las poblaciones bacterianas a lo largo de la vida, con lo que se sugiere una modulación de la microbiota conforme se crece.

Por otra parte, el microbioma en los distintos sitios anatómicos varía de acuerdo con las condiciones fisicoquímicas particulares de cada nicho, como la temperatura, concentración de oxígeno, disponibilidad de nutrientes, pH, etc. Estas condiciones favorecen el desarrollo de distintas comunidades microbianas específicas para cada nicho: oral, gastrointestinal, piel, nasal, vaginal, tracto respiratorio, entre otros. A nivel de *phylum* taxonómico, se pueden observar estas diferencias: por ejemplo, la microbiota oral está caracterizada por una prevalencia de Firmicutes y Proteobacterias, con una menor representación de Bacteroidetes, Actinobacteria y Fusobacterium; por otra parte, la microbiota nasal está compuesta principalmente por los *phyla* Actinobacteria y Firmicutes; mientras que la microbiota vaginal presenta Firmicutes; en tanto que la estomacal

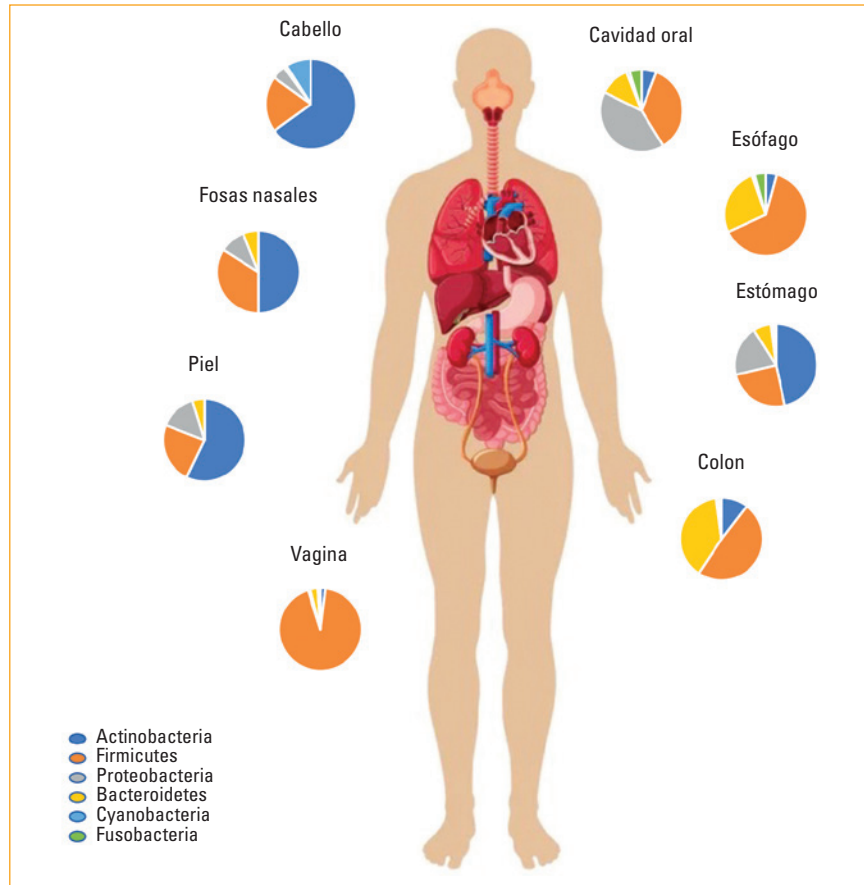


Figura 1. Diferencias en la composición del microbioma por sitio anatómico. Fuente: Wang y cols., 2017.

está caracterizada por la Proteobacteria *Helicobacter pylori* (véase la Figura 1).

El estudio del microbioma se rige por conceptos ecológicos, ya que no se enfoca en el microorganismo como individuo, sino en la comunidad. Entre los conceptos en los que se basa se incluyen simbiosis y antagonismos; estabilidad y resiliencia; extinción y perturbaciones. Todos estos aspectos tienen un impacto en el balance entre salud y enfermedad. Las relaciones simbióticas son interacciones positivas; es decir, ambas especies involucradas obtienen ganancias (mutualismo), como pueden ser nutrientes o hábitat, o bien el beneficio de una no afecta a las otras especies (comensalismo). Por su parte, la resiliencia es la capacidad de la comunidad de regresar a un estado funcional inicial después de una perturbación, mientras que las extinciones pueden suceder después de tratamientos prolongados de antibióticos que resultan en una **disbiosis** que sólo se recupera al restablecer el microbioma.

Como parte de su dinámica, la microbiota forma una parte integral del funcionamiento del cuerpo humano. Entre sus funciones principales están: la digestión, la producción de vitaminas (K, B12, biotina, ácido fólico y pantoténico), la síntesis de aminoácidos a partir de amoníaco o urea, la detoxificación de xenobióticos y la regulación del metabolismo. Por otro lado, también es parte integral de la prevención de la colonización de microorganismos patógenos, al servir como barrera a los microorganismos oportunistas, así como por encargarse de la eliminación de nichos accesibles a patógenos o secreción de inhibidores. Además, se encarga de la “educación” o “entrenamiento” del sistema inmune innato y adaptativo, local y sistémico (Moreno del Castillo y cols., 2018).

#### Microbiota gastrointestinal

La microbiota gastrointestinal es la comunidad de microorganismos residentes del tubo o tracto diges-

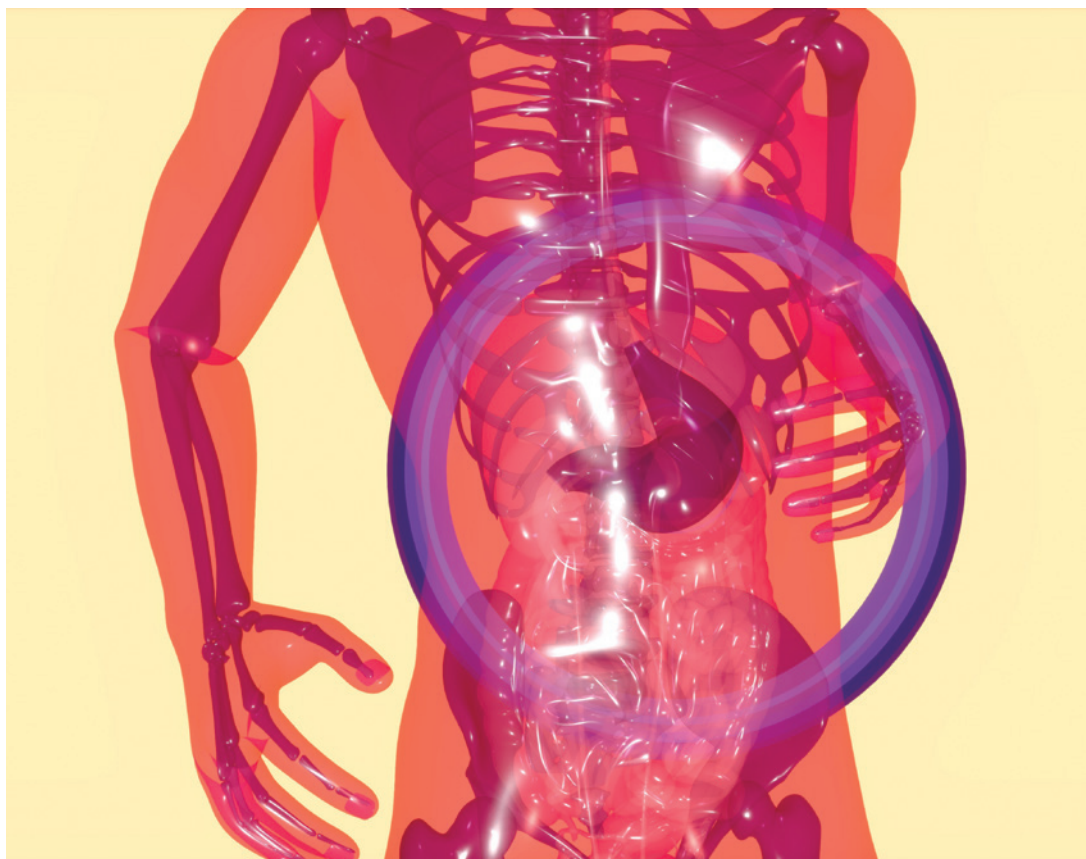
**Disbiosis**  
Desequilibrio entre las distintas especies de la microbiota o en su relación con el hospedero.

tivo, uno de los hábitats más diversos en el cuerpo humano, debido a que tiene distintas características únicas, como temperatura, pH, oxígeno y disponibilidad de nutrientes, las cuales permiten el establecimiento de numerosas bacterias en distintos nichos específicos. La concentración de bacterias incrementa conforme se “avanza” en el tracto gastrointestinal; esto es, en el estómago y el duodeno proximal hay cerca de  $10^1$  o  $10^2$  bacterias/g, mientras que el colón llega a tener  $10^{12}$  bacterias/g. Dada su abundancia y fácil acceso, ha sido uno de los espacios inicialmente estudiados; por ejemplo, una muestra de estudio se puede obtener a partir de la materia fecal, que está compuesta por cerca de 50% de bacterias.

La microbiota gastrointestinal lleva a cabo funciones relacionadas con la salud, como mejorar la digestión y estimular el sistema inmune. Estudios recientes han revelado una estrecha interacción entre la microbiota intestinal y diversas patologías gastrointestinales, así como en otros órganos o sistemas del cuerpo. Esta interacción se lleva al cabo por medio de metabolitos microbianos como los ácidos gra-

dos de cadena corta (AGCC), ácidos biliares secundarios, estimulación de la secreción de citocinas y movilización de microorganismos por la circulación (Taibo, 2022). Por ejemplo, la fermentación de fibra dietética por la microbiota gastrointestinal produce AGCC, como acetato, propionato y butirato, que modulan la motilidad del intestino, la respuesta inmune, además de ser la principal fuente de energía de las células epiteliales del tracto digestivo (Álvarez y cols., 2021). El papel de los AGCC en la comunicación entre el intestino y otros tejidos y sistemas es un tema de investigación en curso.

Es interesante señalar que alrededor de un tercio de la microbiota del tracto gastrointestinal es común en la mayoría de la población humana, aunque existe una proporción de microorganismos determinados por geografía y tipo de dieta. En su conjunto, la microbiota gastrointestinal está dominada principalmente por los *phyla* Bacteroidetes y Firmicutes, y en menor proporción por Proteobacteria, Verrucomicrobia, Fusobacteria, Cyanobacteria, Actinobacteria y Spirochaetes. Sin embargo, no sólo la concentra-



**Tabla 1.** Funciones de la microbiota y enfermedades relacionadas

Microbiota	Funciones	Enfermedades relacionadas
Gastrointestinal	<ul style="list-style-type: none"> <li>Digestión de alimentos, como xiloglucanos presentes en los vegetales</li> <li>Producción de ácidos grasos de cadena corta (acético, propiónico y ácidos butíricos)</li> <li>Síntesis de vitaminas (K, B2, B12)</li> <li>Estimulación del sistema inmune</li> <li>Protección ante la colonización de patógenos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Obesidad</li> <li>Diabetes tipo 2</li> <li>Enfermedad inflamatoria intestinal</li> <li>Cáncer colorectal</li> </ul>
Eje intestino-cerebro	<ul style="list-style-type: none"> <li>Función cognitiva</li> <li>Estado de ánimo</li> <li>Estimulación hormonal</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Autismo</li> <li>Depresión</li> <li>Parkinson</li> <li>Alzheimer</li> </ul>
Respiratoria	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inmunidad pulmonar</li> <li>Protección de colonización de patógenos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>EPOC</li> <li>Asma</li> <li>Fibrosis quística</li> <li>covid-19</li> </ul>

ción, sino también su composición, varían a lo largo del sistema digestivo debido a las diferentes condiciones fisicoquímicas. Por ejemplo, el estómago presenta un ambiente ácido (pH 2), por lo que no hay una gran diversidad de bacterias, sino sólo aquellas que son aerobias y resistentes a la acidez, como *Helicobacter pylori*. En el intestino delgado, donde hay una menor concentración de oxígeno y un pH más alcalino (pH 4), predominan los géneros bacterianos aerobios, como *Streptococcus* y *Lactobacillus*. Conforme nos alejamos del estómago, el ambiente se torna anaerobio y de pH neutro, con lo cual incrementan la concentración y la diversidad bacterianas.

### ■ Relación con enfermedades

■ El desequilibrio entre las distintas especies de la microbiota o en su relación con el hospedero se conoce como disbiosis. Ésta puede ser resultado de la enfermedad o contribuir a su establecimiento, a partir de tres formas principales:

- **Ganancia de función:** la adquisición de patógenos y sus funciones da como resultado un crecimiento desbordado que puede derivar en una inflamación crónica. Este tipo de disbiosis es característica de enfermedades infecciosas como cólera o neumonía por estreptococo.
- **Pérdida de función:** las bacterias protectoras o sus funciones son suprimidas o eliminadas, lo que resulta en el establecimiento de la enfermedad.

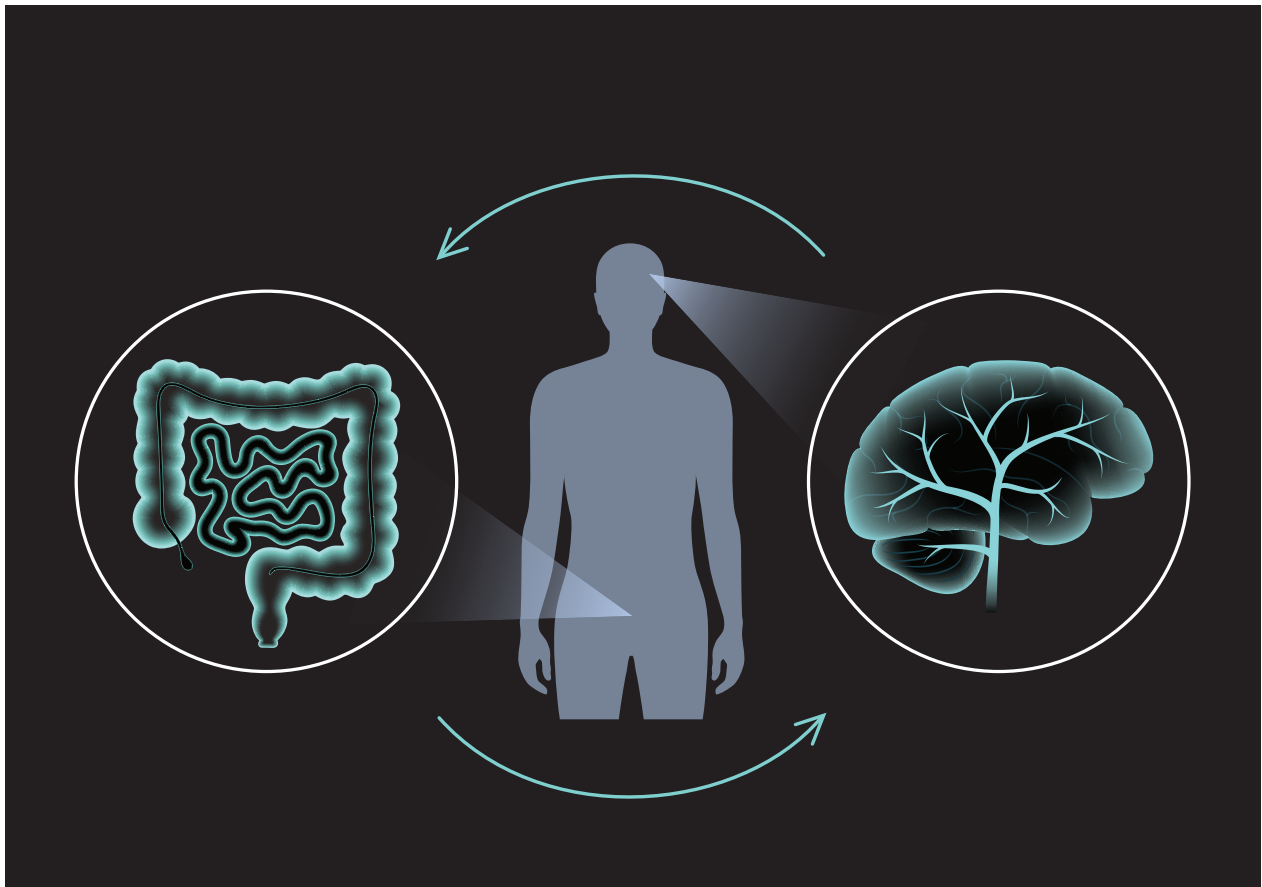
Esta disbiosis se asocia con padecimientos crónicos, como enfermedad intestinal inflamatoria, obesidad y asma (Wilkins y cols., 2019).

- **Combinación de ambas:** es la eliminación de microorganismos “protectores” y el crecimiento excesivo de patógenos. Este tipo de disbiosis es común en la infección por *Clostridium difficile* recurrente, en exacerbaciones de fibrosis quística y en infecciones secundarias después de infecciones virales.

Como mencionamos anteriormente, una de las funciones más importantes de la microbiota gastrointestinal es la modulación de la respuesta inmune. Estudios en pacientes con diversas patologías, tanto infecciosas como no infecciosas, han revelado diferencias en la composición de la microbiota entre individuos sanos y enfermos. Por ejemplo, el síndrome de intestino irritable se correlaciona con una reducción de especies del *phylum* Firmicutes, en particular, especies con actividad antiinflamatoria, como *Faecalibacterium prausnitzii*, así como un incremento en especies de Bacteroidetes, como *Bacteroides fragilis*, además de patógenos oportunistas, como las proteobacterias *Escherichia coli* y *Klebsiella pneumoniae*, que provocan la inflamación de la mucosa intestinal.

El uso excesivo de antibióticos se ha correlacionado con el incremento de infecciones por *Clostridium difficile* como resultado de la disbiosis reflejada en la reducción del número de especies y diversidad en la comunidad microbiana. Estos pacientes muestran una disminución de las **especies nucleares**

**Especie nuclear o clave**  
Especie que es fundamental en el mantenimiento de la estructura de la comunidad ecológica.



fundamentales en la estructura del nicho ecológico de la microbiota; entre éstas, *Alistipes* y *Bilophila* compiten con *C. difficile* por el mismo nicho ecológico y en condiciones normales no le permiten establecerse. Una de las terapias más exitosas en el tratamiento de *C. difficile* es el trasplante fecal, que restaura la microbiota residente y combate “naturalmente” a *C. difficile*. Existen también ejemplos que relacionan la microbiota con enfermedades crónicas, como cáncer, alergias e incluso trastornos mentales.

■ **Eje intestino-microbiota-cerebro**

■ A pesar de que la microbiota gastrointestinal reside en el tracto digestivo, tiene efectos sistémicos, que incluyen la modulación del sistema inmune y la relación intestino-cerebro. Es importante recalcar que el eje intestino-microbiota-cerebro conforma una red de conexiones de múltiples sistemas biológicos (sistema nervioso entérico, autonómico, neuroendocrino, neuroinmune y nervioso central) que permite una comu-

nicación bidireccional entre el microbioma intestinal y el cerebro; es decir, la microbiota gastrointestinal modifica el comportamiento, y el comportamiento modifica la microbiota gastrointestinal. Esta interacción fue propuesta desde el siglo XIX; “lo siento en el estómago”, “seguir una corazonada” o “tengo mariposas en la panza” son remanentes de estas ideas.

No obstante, en los últimos años se ha estudiado esta interacción con más rigor y se han encontrado alteraciones en la microbiota durante episodios de ansiedad, autismo, encefalopatía hepática y otros trastornos mentales. En particular, se encontró una asociación entre ansiedad y depresión con una disminución de especies productoras de AGCC (como *Faecalibacterium* spp. o *Coprococcus*) y el incremento en especies asociadas con inflamación (como *Enterobacteriales*, *Desulfovibrio*, etc.). Otros estudios han demostrado que los AGCC modifican la expresión genética de algunos neurotransmisores, lo cual se puede traducir en cambios tanto psiquiátricos como de comportamiento (Castañeda Guillot, 2020).

## ■ Conclusiones

■ Los seres humanos, y la mayoría de los organismos eucariontes complejos, tenemos 50% de microbios en el cuerpo. La microbiota es parte esencial de lo que somos y de cómo funcionamos, por lo que desempeña un papel fundamental en el entrenamiento o desarrollo del sistema inmune, en el metabolismo y en el comportamiento. El desbalance de estas comunidades microbianas deviene en enfermedades, que a su vez conllevan un desajuste de la microbiota y el hospedero. La manipulación de la microbiota es una terapia alternativa de varias enfermedades, como diabetes y obesidad, así como infecciones gastrointestinales o respiratorias.

### Itzel Elizalde Rodríguez

Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco e Instituto Nacional de Medicina Genómica.  
itzel.er.cielo@gmail.com

### Dianareli Hernández H.

Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco e Instituto Nacional de Medicina Genómica.  
dianaren93@gmail.com

### Eugenia Silva-Herzog

Unidad de Vinculación Científica, Facultad de Medicina, Universidad Nacional Autónoma de México e Instituto Nacional de Medicina Genómica.  
esilvaherzog@inmegen.gob.mx

## Referencias específicas

- Álvarez, J., J. M. F. Real, F. Guarner, M. Gueimonde, J. M. Rodríguez, M. S. de Pipaon y Y. Sanz (2021), "Microbiota intestinal y salud", *Gastroenterología y Hepatología*, 44(7):519-535.
- Andreo-Martínez, P., N. García-Martínez y E. P. Sánchez-Samper (2017), "La microbiota intestinal y su relación con las enfermedades mentales a través del eje microbiota-intestino-cerebro", *Revista de Discapacidad, Clínica y Neurociencias*, 4(2):52-58.
- Castañeda Guillot, C. (2020), "Microbiota intestinal y trastornos del comportamiento mental", *Revista Cubana de Pediatría*, 92(2):en línea.
- Maestre, M. E. y E. G. Díaz (2021), "Papel de la microbiota intestinal en la inmunidad", *MoleQla: Revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, 41:7.
- Moreno del Castillo, M. C., J. Valladares-García y J. Halabe-Cherem (2018), "Microbioma humano", *Revista de la Facultad de Medicina (México)*, 61(6):7-19.
- Taibo Eirea, S. (2022), *Microbiota intestinal en enfermedades inflamatorias intestinales*, Santiago Compostela, Universidad de Santiago Compostela.
- Volcy, C. (2007), "Historia de los conceptos de causa y enfermedad: paralelismo entre la Medicina y la Fitopatología", *Iatreia*, 20(4):407-421.
- Wang, B., M. Yao, L. Lv, Z. Ling y L. Li (2017), "The human microbiota in health and disease", *Engineering*, 3(1):71-82.
- Wilkins, L. J., M. Monga y A. W. Miller (2019), "Defining Dysbiosis for a Cluster of Chronic Diseases", *Sci. Rep.*, 9:12918.
- Zamudio-Vázquez, V. P. et al. (2017), "Importancia de la microbiota gastrointestinal en pediatría", *Acta Pediátrica de México*, 38(1):49-62.

# Vehículos submarinos autónomos para un océano Ártico cambiante

El Ártico es el más cambiante de los océanos. Las anomalías y perturbaciones climáticas son más notorias en esta zona que en otras latitudes. El uso de vehículos submarinos autónomos permite registrar los cambios físicos y biogeoquímicos en esta región polar, realizar el monitoreo de la fauna y del tráfico marino en sus aguas e, inclusive, redefinir las fronteras marítimas de los países árticos.

## ■ El océano Ártico, escenario del cambio climático

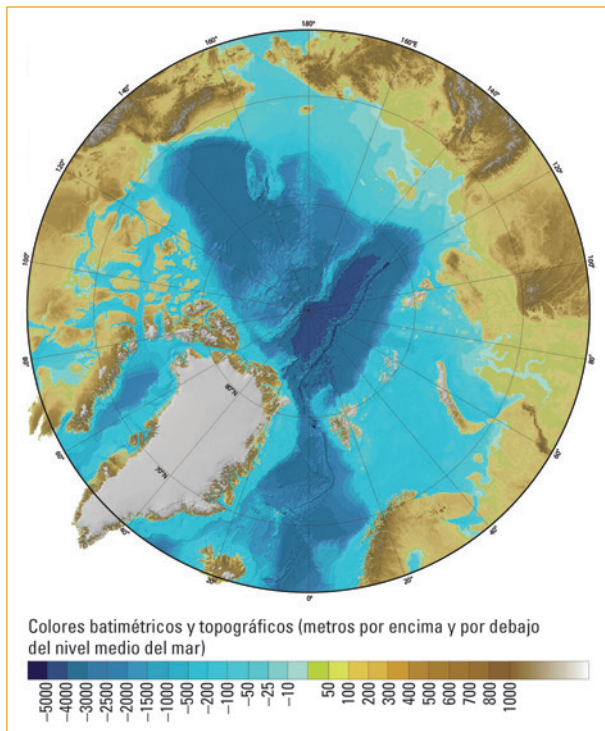
■ Ubicado en la región polar del hemisferio norte, el océano Ártico ocupa un área cercana a los 14 millones de kilómetros cuadrados y es el más pequeño de los océanos (véase la Figura 1). Este gran cuerpo de agua dentro del Círculo Polar Ártico está rodeado por los territorios de Canadá, Groenlandia, Islandia, Noruega, Rusia y Estados Unidos de América. Se comunica con el océano Atlántico Norte mediante el mar de Barents y el estrecho de Fram; toca también el Pacífico a través del estrecho de Bering.

El Ártico es un océano estratificado: formado por varias capas de agua con diferentes características de densidad y temperatura, como un pastel mil hojas. Durante gran parte del año lo recubre una capa de hielo marino (llamada banquisa) que alcanza su máximo de cobertura en el invierno y el mínimo al final del periodo estival. Este océano alberga a cerca de 400 especies animales, incluidos grandes mamíferos marinos, como osos polares, focas, morsas, narvales y otros cetáceos. No obstante, por sus características, es un ecosistema frágil y su estabilidad depende de pequeños organismos fotosintéticos, como las microalgas, cuya producción primaria depende del acceso a la luz solar. Durante el invierno, la noche polar puede durar 24 horas; en los veranos, el día polar y el sol de medianoche se extienden por un periodo similar.

El océano Ártico es también el hogar de 40 grupos étnicos, cuya sustentabilidad está estrechamente ligada al mar, tanto en verano como en invierno. Además esta región es el escenario principal del cambio climático en el norte del planeta, donde los efectos son más notorios, rápidos e intensos que en latitudes menores.







**Figura 1.** Mapa batimétrico y topográfico del océano Ártico. Los colores están asociados a una determinada profundidad (azules) o elevación (marrón), indicada en metros. Fuente: The International Bathymetric Chart of the Arctic Ocean (IBCAO) Version 3.0, *Geophysical Research Letters*.

Un fenómeno evidente es la pérdida acelerada de la banquisa durante el verano; se estima que la cobertura de hielo decrece 13.1% cada década (NSIDC, 2020). Este evento da lugar a un efecto denominado Pan-Ártico, que modifica tanto la temperatura del agua y las condiciones de luz como las relaciones dentro de la cadena trófica (conocida como cadena alimenticia).

La comunidad científica concuerda en que los siguientes cambios sistémicos pueden esperarse: pérdida de la banquisa en el periodo estival, cambios en la circulación oceánica, acidificación del agua, disminución o derretimiento de los glaciares de Groenlandia y deshielo del permafrost (capa de suelo permanentemente congelado) en territorios insulares y continentales. Entre los cambios biológicos, se pueden esperar perturbaciones en la cadena trófica, desplazamiento o disminución de la flora y fauna locales, así como su remplazo por otras especies meridionales. Además, el océano Ártico también experimentará cambios sociales, económicos y de seguridad, como el desplazamiento de la cultura Inuit

(habitantes originarios) y el incremento en la densidad demográfica. También sufrirá por el aumento del tráfico marítimo y la apertura de nuevas rutas de navegación, dado el creciente interés en la explotación mineral y de hidrocarburos, y posiblemente por la redefinición de las fronteras actuales, ya que hay países al exterior del Círculo Polar Ártico que también han puesto atención en la región. Un caso especial es el de China, que ve a este océano como una zona de valor en su ambiciosa iniciativa de desarrollo de infraestructura global y cooperación internacional llamada la Franja y la Ruta (Belt and Road).

### ■ ■ ■ Los vehículos autónomos submarinos

Durante la última década, la robótica marina se ha posicionado como una tecnología madura para el estudio y la caracterización de los océanos, de manera específica, mediante el uso de vehículos autónomos submarinos (véase el Recuadro 1). Hay diferentes tipos de robots para cubrir las necesidades de cada investigación, con características, capacidades y consumos energéticos diferentes.

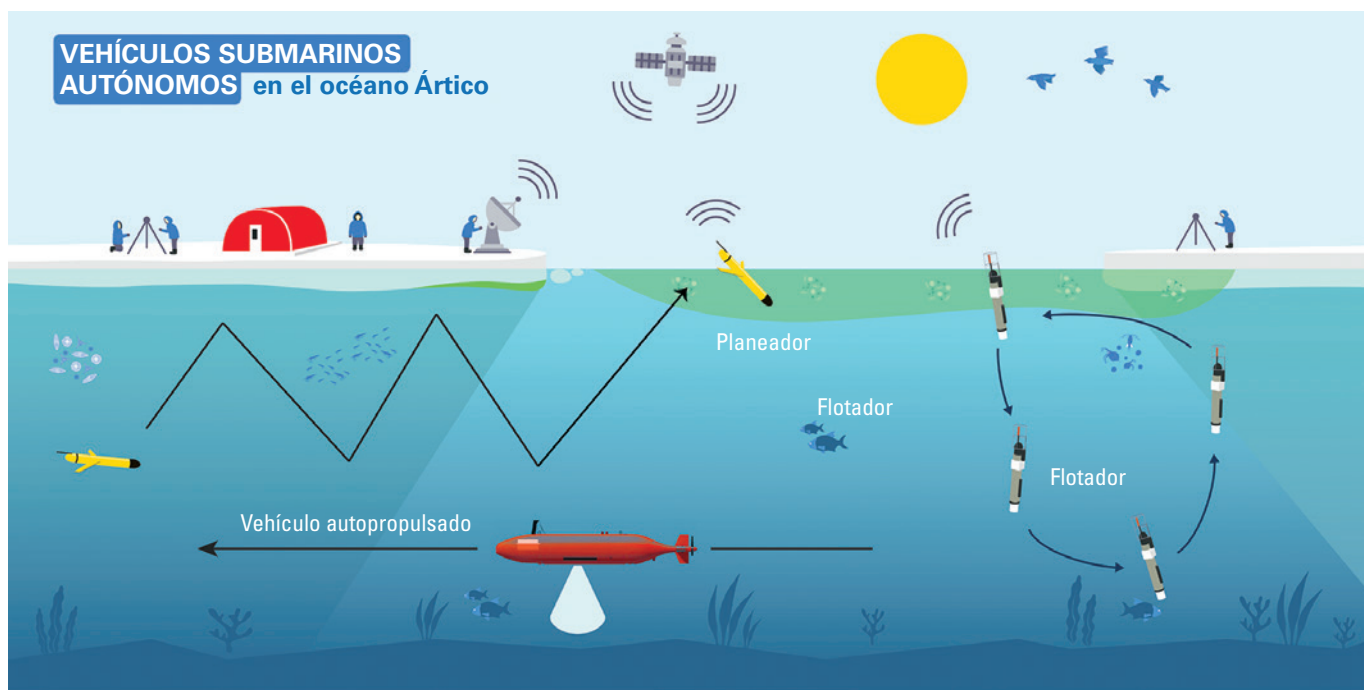
Los flotadores son robots que derivan con las corrientes marinas, ya que no tienen capacidad de dirección. Mediante un circuito hidráulico, controlan su flotabilidad y pueden situarse en profundidades precisas de la columna de agua; de esta manera, se comportan como lo haría un globo aerostático en el aire. Por lo general, durante su ciclo de navegación, descienden hasta una profundidad de 2 000 metros y ascienden a la superficie haciendo el muestreo de las variables científicas. Durante el ciclo de muestreo, diversos sensores recolectan datos físicos y biogeoquímicos, como la salinidad, temperatura, clorofila, materia orgánica disuelta, oxígeno disuelto, niveles de luz solar (radiancia), nitratos, retrodispersión de la luz y el pH. Estos robots pueden flotar y derivar durante años recolectando y transmitiendo datos de interés, puesto que su consumo de energía es muy bajo.

Los planeadores submarinos son robots que se deslizan en las corrientes marinas y sí tienen capacidad de dirección. Un circuito hidráulico les permite controlar su flotabilidad y, por medio de dos alerones, consiguen desplazarse horizontalmente siguiendo

### Recuadro 1. Robótica marina

Los vehículos autónomos submarinos son robots utilizados para aumentar o disminuir la escala espacio-temporal de los sondeos científicos. Éstos se desplazan por cuenta propia atravesando los océanos, o bien son comandados desde una embarcación o desde una base terrestre, y son capaces de cubrir un volumen oceánico considerable. Esta tecnología complementa el esfuerzo hecho a bordo de los buques oceanográficos de investigación científica para

potencializar el monitoreo global de los mares. Su uso requiere menos recursos que un buque oceanográfico y los datos obtenidos son igualmente valiosos, más numerosos y menos costosos. Hay tres tipos principales de vehículos autónomos submarinos utilizados en las regiones polares: los flotadores, los planeadores submarinos y los vehículos autónomos autopropulsados (véase la Figura 2).



**Figura 2.** Vehículos submarinos autónomos en el océano Ártico. Los flotadores derivan con las corrientes mientras ascienden y descienden a través de la columna de agua. Los planeadores marinos se deslizan en las corrientes siguiendo un patrón de dientes de sierra. Los vehículos submarinos autopropulsados se desplazan ayudados por una hélice. Fuente: Laboratorio Takuvik/Julie Sansoulet.

un patrón de dientes de sierra. Planean bajo el agua como lo haría un avión planeador en el aire y son vehículos versátiles con un bajo o medio consumo de energía, por lo que llevan a cabo misiones extensas en tiempo y espacio. Un planeador es capaz de recorrer cientos y hasta miles de kilómetros durante semanas o meses mientras va realizando el muestreo de datos de interés. Los planeadores marinos están equipados con sensores físicos y biogeoquímicos; además, pueden contar también con sistemas acústicos pasivos, para analizar el ambiente sonoro bajo el agua.

Se han desarrollado también vehículos autopropulsados que se trasladan a través de las corrientes ayudados por una hélice. Este tipo de vehículos tienen flotabilidad neutra y pueden desplazarse a una profundidad constante manteniendo una velocidad de hasta 4 nudos (un nudo equivale a 1.852 km/h). Comparados con los vehículos descritos anteriormente, su consumo de energía es alto; sin embargo, su maniobrabilidad es mayor y se desplazan como lo haría un avión de hélice en el aire. Con ellos, se pueden planear misiones precisas y rápidas, con una duración

de horas o días, extendidas por decenas o cientos de kilómetros. Debido a la potencia elevada de sus baterías, son capaces de integrar sistemas acústicos activos, como ecosondas, sonares de barrido lateral y sensores de subsuelo. Con estos sistemas a bordo del vehículo, es posible cartografiar el fondo marino.

■ **Adaptarse a un océano como ningún otro**

■ Los vehículos submarinos autónomos en el océano Ártico se enfrentan a desafíos mayores que en los océanos de otras latitudes. En primer lugar, la temperatura del agua desciende hasta  $-1.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; bajo estas condiciones, numerosos sensores comerciales presentan problemas en ambientes tan fríos. En segundo lugar, las operaciones de lanzamiento y recuperación son más costosas que en latitudes menores. No obstante, el mayor peligro para estos robots marinos es el hielo de mar (véase el Recuadro 2).

La técnica más simple que puede utilizar un vehículo submarino autónomo para percibir la presencia o ausencia de hielo en la superficie consiste en medir

la temperatura del agua mientras asciende (Le Traon y cols., 2020). Sin embargo, esta solución tiene como desventaja su carácter local. El umbral varía según la zona, lo que significa un problema de movilidad que, a su vez, puede resolverse con técnicas de aprendizaje automático.

El diseño de sensores para la detección de hielo es otra alternativa que ha tenido buenos resultados. Los sistemas optoelectrónicos activos aprovechan las características físico-ópticas del hielo marino, como su capacidad de despolarizar la luz (Lagunas y cols., 2018). Mediante el uso de un haz de luz coherente (láser), un sensor de este tipo puede evaluar la presencia o ausencia de banquisa en la superficie y al mismo tiempo es capaz de hacer mediciones de su grosor.

También se utilizan sistemas acústicos activos para la navegación de estos vehículos bajo el hielo. Los altímetros revertidos, técnica en la cual el transductor apunta hacia la superficie, son otra alternativa. Aunque estos sensores permiten un rango de medición mucho mayor que los sistemas ópticos, su resolución es inferior y no son recomendables en la presencia de capas finas de hielo.

Hay sistemas más avanzados y complejos que también se utilizan a bordo de los vehículos que cumplen con los requerimientos de energía y capacidad volumétrica para portarlos. Estos sistemas no son solamente útiles para la detección del hielo, sino también para la navegación del robot en zonas cubiertas. Las ecosondas por lo general se usan para la cartografía del fondo marino; sin embargo, cuando son revertidas —es decir, cuando son dirigidas hacia el fondo del hielo— también pueden servir para el mapeo de la morfología del hielo bajo el agua, lo cual ayuda a la navegación. De manera similar, un medidor hidroacústico de corrientes, si es revertido, puede medir la velocidad relativa entre el vehículo y el hielo. Esta variable, combinada con la información de los sensores de movimiento, ayuda al vehículo a estimar su posición bajo la banquisa.

■ **Algunos registros obtenidos**

■ En el futuro, se perfila un océano Ártico más dinámico: con mayor movimiento, más calor y menos

**Recuadro 2. Robots bajo el hielo de mar**

El hielo es un obstáculo natural para la navegación segura de los vehículos submarinos autónomos. Para orientar su navegación y enviar la información recolectada durante los sondeos, los robots utilizan la red GPS y las constelaciones satelitales, como la red Iridium o Starlink. Las señales transmitidas por los satélites (microondas) se absorben y dispersan rápidamente en el agua penetrando sólo algunos centímetros bajo la superficie. Por lo tanto, estos robots se ven forzados a emerger para obtener las coordenadas geográficas de su posición y transmitir los datos científicos registrados.

Ciertos sectores del océano Ártico se encuentran libres de hielo durante pocos meses al año. El resto del tiempo, la banquisa (capa de hielo marino) impide a los vehículos el acceso a la superficie. Para evadir el hielo, los robots tienen dos opciones: permanecer bajo el agua durante meses o encontrar zonas descubiertas para emerger. La segunda opción requiere el desarrollo de tecnologías fiables para la detección del hielo de mar y nuevos protocolos de navegación bajo la banquisa. De esta manera, las operaciones de registro de datos no serían interrumpidas, ni por la presencia de hielo ni por la noche ártica.

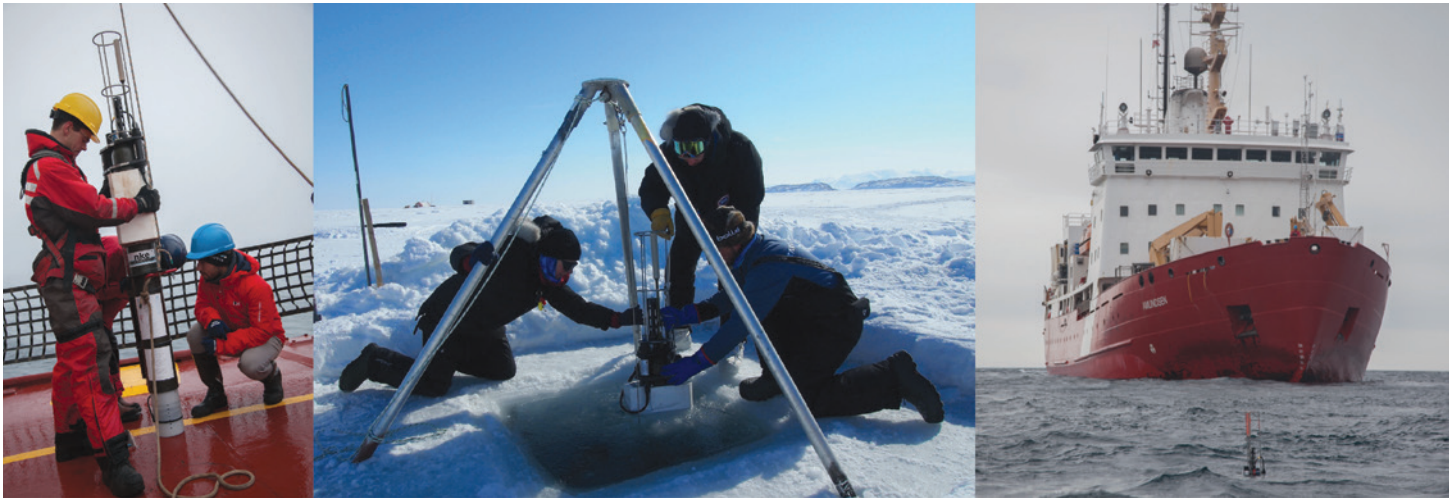


**Figura 3.** Operaciones de lanzamiento y recuperación de planeadores submarinos a bordo del rompehielos científico Amundsen, en la Bahía de Baffin, Canadá. Fuente: Laboratorio Takuvik.

hielo; más parecido a los de latitudes menores. Debido al aumento en la temperatura del aire, una constante reducción del hielo marino en el periodo estival contribuye al cambio de la estructura interna del océano. El uso de vehículos autónomos submarinos ha aportado información relevante para empezar a comprender este fenómeno.

Los planeadores submarinos son particularmente útiles para el muestreo de grandes volúmenes de agua en el mar de Barents, ubicado en la cuenca Euroasiática del este (véase la Figura 3). Estos robots registran las variables fundamentales para los estu-

dios oceanográficos de la región, como la salinidad y la temperatura en diferentes profundidades. Debido a la ausencia de hielo, recientemente se ha constatado que hay una reducción de la capa haloclina, la cual es una capa de la columna de agua en la que la salinidad cambia rápidamente con la profundidad. Muy cerca de la superficie (40-200 m), esta capa aísla al hielo marino de la influencia de otras franjas de agua más profundas. Como consecuencia de esta disminución, la masa de agua atlántica, que viaja bajo la capa haloclina, transmite su calor a la superficie. Este evento puede acelerar aún más la desaparición



**Figura 4.** *Izquierda:* preparación de un flotador biogeoquímico Argo para su lanzamiento. *Centro:* un flotador es liberado a partir de la banquisa. *Derecha:* un flotador emerge en un área libre de hielo. Fuente: Pascaline Bourgain y Claudie Marec.

de la banquisa durante el periodo estival en el Ártico. El fenómeno se conoce como la Atlantificación del océano Ártico del este (Polyakov y cols., 2020).

De forma similar, en la cuenca Amerasiana, la información recolectada por planeadores submarinos ha servido para formar series temporales de la región. Se ha observado que las aguas del océano Pacífico comienzan a fluir más allá del estrecho de Bering, y este influjo, que transporta consigo especies y nutrientes del sur, se mezcla posteriormente con el mar de Chukchi en el océano Ártico del oeste. La borealización, como se llama al influjo de océanos subárticos hacia las cuencas Euroasiática y Amerasiana del océano Ártico, ilustra la delicadeza del ecosistema frente a la fuerza del cambio climático.

El océano Ártico es el hogar de una comunidad importante de seres vivos, desde microbios hasta mamíferos. Estos organismos dependen de la producción primaria de biomasa vegetal por parte de algas marinas microscópicas que transforman energía y materia inorgánica en materia orgánica (mediante la fotosíntesis); dicha energía viene principalmente de la luz solar. Debido al aumento en la temperatura de la región, una menor cobertura de hielo en la superficie resulta en una mayor cantidad de luz al interior del océano, lo cual es aprovechado por los organismos fotosintéticos. De igual manera, se ha identificado un aumento de nutrientes inorgánicos en algunas regiones de este océano, como resultado

de la borealización. En consecuencia, la producción primaria de los organismos fotosintéticos creció 57% entre 1998 y 2018 (Lewis y cols., 2020). Esto se atribuye a la reducción del hielo, a un aumento en la concentración de clorofila-a (pigmento fotosintético y tipo de clorofila más abundante) y al influjo de nutrientes inorgánicos (Babin, 2020).

Los vehículos flotadores biogeoquímicos, adaptados a las condiciones polares, miden la cantidad de nitratos, clorofila-a, materia orgánica disuelta y oxígeno disuelto, así como los niveles de radiación solar en la columna de agua. Estos robots forman parte de la exitosa red mundial de flotadores Argo, que cuenta con casi 4 000 unidades que actualmente están registrando datos científicos en los océanos del mundo (Le Traon y cols., 2020). En el último lustro, estos vehículos se han convertido en un apoyo importante para la ciencia polar (véase la Figura 4). Los datos que envían indican la presencia de florecimientos masivos de fitoplancton bajo el hielo y también han registrado una constante actividad orgánica durante la noche ártica (Randelhoff y cols., 2020). En el invierno polar, los niveles de luz son tan bajos que, antes de estos estudios, se consideraba que toda actividad orgánica básica permanecía durmiente durante dicho periodo; pero aún es temprano para predecir las consecuencias de un crecimiento sostenido de la producción primaria en esta región, por lo que se necesitan más observaciones.



**Figura 5.** *Izquierda:* lanzamiento del vehículo autónomo autopropulsado Explorer para una misión de cartografía, a partir de un campamento de hielo, cerca de la isla Borden en el alto Ártico canadiense. Fuente: Don Glencross, DRDC-Atlantic. *Derecha:* recuperación de un vehículo autónomo submarino autopropulsado por el buque CCGS Louis, St-Laurent en el área de Sever Spur, en la cuenca Ártica canadiense. Fuente: Fisheries and Oceans Canada.

### Robots que escuchan el ambiente marino Ártico

Los estudios acústicos en el océano Ártico también están caracterizados por la presencia de hielo en la superficie. El hielo de mar no es un fenómeno estático: responde al viento, a las corrientes, al estrés térmico y al oleaje. Durante el invierno y la primavera, el ambiente acústico está dominado por la deformación y la fractura de la banquisa en movimiento, por lo que los sonidos abruptos de ruptura de hielo y el choque entre las placas son un interesante objeto de estudio, debido a que están relacionados con la climatología local. Durante los meses de verano, los niveles de sonido causados por las actividades humanas ocurren de manera cada vez más frecuente en zonas libres de hielo. Así, el campo sonoro submarino en el Ártico varía ampliamente con las estaciones, con los movimientos de la banquisa y según la ubicación geográfica.

Los planeadores submarinos y flotadores en la región se adaptan mediante la integración de módulos de monitoreo acústico. Estas mejoras permiten detectar y clasificar sonidos; también proporcionan las escalas temporales y geográficas adecuadas para representar la variabilidad del campo acústico mari-

no en el Ártico. En los datos registrados, es posible percibir las variaciones tonales de diferentes tipos de mamíferos marinos y documentar su distribución, además de contabilizar el tráfico marítimo y monitorear las actividades del sector industrial. El monitoreo acústico por medio de vehículos autónomos submarinos ha permitido relacionar el comportamiento biológico de las especies endémicas y migratorias con algunas de las variables físicas del océano. Por ejemplo, se ha logrado correlacionar la cadencia de los llamados y cantos de algunas variantes de ballenas, focas y morsas, con la salinidad en la superficie del agua (Baumgartner y cols., 2014). También se han registrado vocalizaciones de estos mamíferos marinos mientras siguen el borde de la banquisa en sus rutas migratorias (Worcester y cols., 2020).

La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (Conmevar) permite la revisión de los límites marítimos de los países que la han firmado y ratificado. Si la plataforma continental de un país se extiende más allá del límite de la zona económica exclusiva —es decir, más de 200 millas náuticas a partir de la costa—, los Estados pueden solicitar la extensión de sus fronteras marítimas. De ser apro-

bada la petición, el país solicitante tendría derecho exclusivo sobre el uso del suelo y subsuelo dentro de la zona extendida. Noruega, Rusia, Canadá y Dinamarca presentaron peticiones individuales ante la Comisión de Límites de la Plataforma Continental de la Conmevar concernientes a la extensión de sus fronteras marítimas en el océano Ártico.

Cualquier Estado que pretenda tener éxito en este proceso debe presentar una petición sostenida en la información técnica y un análisis científico riguroso; por este motivo, durante las últimas dos décadas, los países mencionados han hecho uso de vehículos submarinos autopropulsados para cartografiar de manera detallada el fondo marino Ártico. Estos robots han operado en zonas donde la presencia de hielo es aún perenne y el acceso resulta extremadamente limitado o imposible (véase la Figura 5). Dichos estudios tienen una influencia importante en la definición de nuevas fronteras para las naciones árticas, así como en la consolidación de la ciencia como una alternativa en los retos diplomáticos mundiales (Sovereignty y UNCLOS, 2019).

Las actividades humanas en esta región han aumentado de una manera considerable. Para los países del Círculo Polar Ártico, la capacidad de garantizar la seguridad de sus intereses y la soberanía sobre sus territorios es primordial. Por ello, la defensa es un sector que también aprovecha la versatilidad de los vehículos submarinos autónomos y los emplea de manera sistemática para la prevención de riesgos para la seguridad territorial. Los países árticos usan planeadores submarinos y vehículos autopropulsados en actividades de reconocimiento e inteligencia, en el apoyo al combate contra la pesca ilegal y el contrabando, en el monitoreo de zonas protegidas y, en caso necesario, en la protección de las fronteras marítimas.

**José Luis Lagunas Morales**

Centro de Investigaciones del Atlántico, Departamento Nacional de la Defensa Canadiense.  
Jose.Lagunas@drdc-rddc.gc.ca

**Referencias específicas**

Babin, M. (2020), "Climate change tweaks Arctic marine ecosystems", *Science*, 369:137-138.

Baumgartner, M. et al. (2014), "Glider-based passive acoustic monitoring in the Arctic", *Mar. Technol. Soc. J.*, 40:40-51.

Lagunas, J. et al. (2018), "Sea-ice detection for autonomous underwater vehicles and oceanographic lagrangian platforms by continuous-wave laser polarimetry", *Ocean Sens. Monit. X*, 10631:106310W.

Le Traon, P-Y. et al. (2020), "Preparing the New Phase of Argo: Scientific Achievements of the NAOS Project", *Front. Mar. Sci.*, 7:838.

Lewis, K. et al. (2020), "Changes in phytoplankton concentration now drive increased Arctic Ocean primary production", *Science*, 369:198-202.

National Snow and Ice Data Center (2020), "Sea Ice Index", *NSIDC*. Disponible en: [https://nsidc.org/data/seaice\\_index](https://nsidc.org/data/seaice_index), consultado en noviembre de 2020.

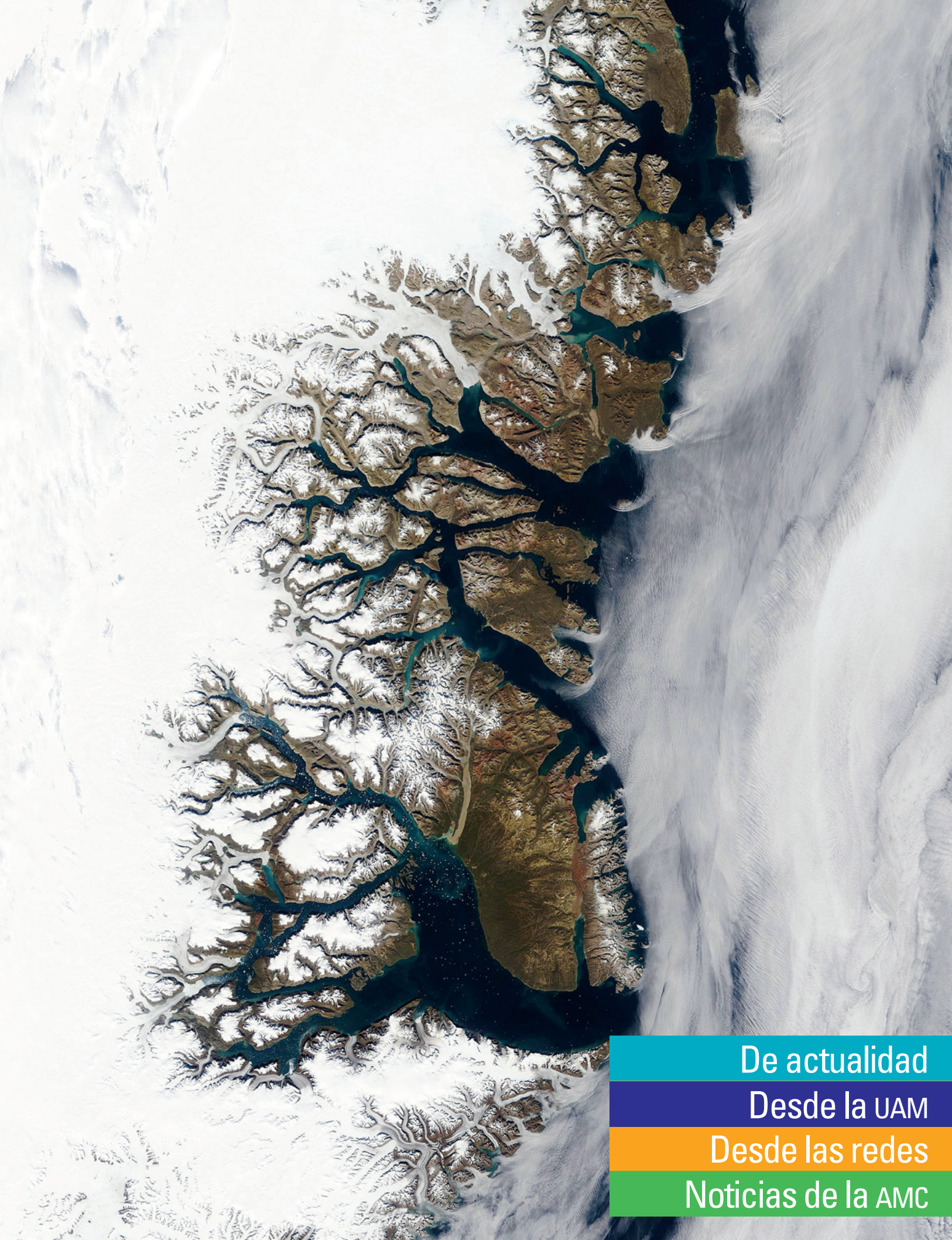
Polyakov, I. et al. (2020), "Borealization of the Arctic Ocean in Response to Anomalous Advection From Sub-Arctic Seas", *Front. Mar. Sci.*, 7:491.

Randelhoff, A. et al. (2020), "Arctic mid-winter phytoplankton growth revealed by autonomous profilers", *Science Advances*, 6(39): en línea.

Sovereignty y UNCLOS (2019), "Defining Canada's Extended Continental Shelf", *Government of Canada*. Disponible en: <https://www.dfo-mpo.gc.ca/science/hydrography-hydrographie/UNCLOS/index-eng.html>, consultado en noviembre de 2020.

Worcester, P. et al. (2020), "Ocean Acoustics in the changing Arctic", *Acoustics Today*, 16:55.





De actualidad  
Desde la UAM  
Desde las redes  
Noticias de la AMC

Adolfo Guzmán Arenas

# ChatGPT, el nuevo y asombroso *chatbot* de inteligencia artificial

ChatGPT fue diseñado para producir lenguaje humano bastante natural; pregúntele lo que sea y recibirá una respuesta como si la hubiera escrito alguien más, algo parecido a tener una conversación. Esta novedosa herramienta de inteligencia artificial impresiona rápidamente, pero muchas personas han señalado que tiene algunas dificultades serias. En este artículo explico su funcionamiento, peligros y usos.

ChatGPT es un nuevo y poderoso *chatbot* de inteligencia artificial (IA) diseñado para producir lenguaje humano bastante natural. Pregúntele lo que quiera y recibirá una respuesta que suena como si la hubiera escrito un humano, ya que ha aprendido los conocimientos y habilidades de escritura de las personas al ser entrenado con cantidades masivas de datos en internet. Al igual que tener una conversación con alguien, usted puede hablar con ChatGPT, y éste recordará las cosas que usted le ha dicho en el pasado y, al mismo tiempo, podrá corregirse cuando lo desafíen. Por ello, ChatGPT impresiona rápidamente, pero muchas personas han señalado que tiene algunas dificultades serias.

## ¿Cómo trabaja ChatGPT?

ChatGPT funciona a partir de su “transformador preentrenado generativo” (GPT, por sus siglas en inglés), que es una red neuronal artificial gigantesca de aprendizaje mecánico que utiliza algoritmos especializados para encontrar patrones dentro de las secuencias de datos (Hetler, 2023). Ante una pregunta, el transformador extrae una cantidad significativa de datos para formular una respuesta. Se basa en el modelo de lenguaje GPT-4, lanzado el 14 de marzo de 2023 por OpenAI, como una versión mejorada de GPT-3.

OpenAI, una empresa de investigación en IA fundada en 2015, creó ChatGPT y lo lanzó en noviembre de 2022. OpenAI cuenta con el respaldo de varios inversionistas, entre los cuales destaca Microsoft. La misma empresa también creó Dall-E, una herramienta de IA que genera imágenes de arte a partir de descripciones de texto.



En este artículo hablaré tanto de ChatGPT como de GPT-3, y por extensión, de GPT-4, que ha sido entrenado con muchos más datos. GPT-2 apareció en 2019; este modelo usó 40 gigabytes (GB) de textos. Luego, GPT-3 se entrenó con 570 GB de datos tomados de Wikipedia, diversos sitios internet y otras fuentes. No obstante, el fabricante no ha compartido qué tan grande es el conjunto de datos usado para GPT-4 (Heikkilä, 2023).

ChatGPT utiliza el aprendizaje profundo, una forma de aprendizaje automático para producir texto similar al lenguaje humano a través de redes neuronales transformadoras. El transformador predice el texto, integrando la siguiente palabra, oración o párrafo, según la secuencia típica de sus datos de entrenamiento. La capacitación comienza con datos genéricos, luego pasa a datos más personalizados para una tarea específica. Así, ChatGPT se entrenó con texto en línea para aprender el lenguaje humano y luego usó transcripciones para aprender los conceptos básicos de las conversaciones.

Las personas que lo entrenaron constantemente le brindaron conversaciones y clasificaron las respuestas. De esta manera, ayudaron a determinar las mejores respuestas. Para seguir entrenando al *chatbot*, los usuarios pueden votar a favor o en contra de la respuesta haciendo clic en los íconos de “pulgar hacia arriba” o “pulgar hacia abajo” que se encuentran a un lado. Los usuarios también pueden escribir comentarios adicionales para mejorar y afinar el diálogo futuro.

En resumen, ChatGPT conoce la sintaxis: no genera frases como “las perro comen carne”; conoce la semántica: no genera frases como “los perros comen polinomios”; tiene buen sentido común: no genera frases como “los perros comen 100 kilos de carne diariamente”. Mucho de lo que responde concuerda con la información que hay en internet, pero también inventa respuestas que parecen razonables, y revuelve lo cierto con sus mentiras (“alucinaciones”).

### ■ Los peligros de ChatGPT

■ ChatGPT genera respuestas incorrectas, falla en matemáticas básicas, parece que no puede responder preguntas lógicas simples e incluso llega a argumen-

tar hechos completamente incorrectos (Wu, 2023; Agomuoh, 2023). A diferencia de otros asistentes de IA, como Siri o Alexa, ChatGPT no utiliza internet para encontrar las respuestas. En su lugar, construye una oración palabra por palabra, seleccionando el “símbolo” más probable que debería venir a continuación, en función de su entrenamiento. En otras palabras, ChatGPT llega a una respuesta haciendo una serie de conjeturas, lo cual es parte de la razón por la cual puede argumentar respuestas incorrectas como si fueran completamente ciertas.

Si bien es excelente para explicar conceptos complejos, lo que lo convierte en una herramienta poderosa para el aprendizaje, es importante no creer todo lo que dice ChatGPT. Recuerde que la herramienta no siempre está en lo correcto, pues tiene un conocimiento limitado de los eventos mundiales después de 2021.

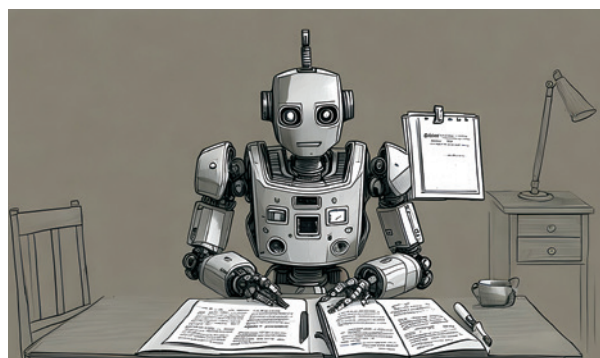
Hay demasiadas formas en que se puede abusar de estos sistemas, ya que se distribuyen gratuitamente y no existe una revisión o regulación para evitar los daños. Por lo tanto, han surgido muchas críticas y preocupaciones al respecto de su uso.

#### *ChatGPT tiene un sesgo integrado en su sistema*

Este *chatbot* se entrenó con la escritura colectiva de las personas en todo el mundo, del pasado y del presente. Por esta razón, los mismos sesgos que existen en el mundo real también pueden aparecer en el modelo de IA.

#### *ChatGPT podría generar los ensayos que se les pide a estudiantes de secundaria*

En realidad, cualquier estudiante puede pedirle a ChatGPT que revise su ensayo o le indique cómo



mejorar un párrafo, o bien puede abstenerse totalmente de redactarlo y pedirle a ChatGPT que escriba todo. Esta herramienta incluso genera respuestas mejores que las que muchos alumnos podrían hacer, como escribir cartas de presentación o describir temas importantes de una obra literaria famosa.

### *ChatGPT podría causar daños en el mundo real*

La información incorrecta de ChatGPT puede causar daños en el mundo real, por ejemplo, al dar un consejo médico incorrecto. Pero también hay otras preocupaciones. La velocidad a la que puede generar un texto que suena natural hace que sea muy fácil para los estafadores hacerse pasar por alguien más en las redes sociales digitales. Del mismo modo, será difícil detectar un correo electrónico de *phishing*, diseñado para extraer detalles confidenciales. Además, ChatGPT produce texto sin errores gramaticales, lo que solía alertar de que el correo era mal intencionado.

### *ChatGPT puede difundir información falsa*

La escala a la que ChatGPT puede producir texto, junto con la capacidad de hacer que incluso la información incorrecta suene convincentemente correcta, sin duda hará que la información en internet sea aún más cuestionable. Es decir, si muchos usuarios de ChatGPT deciden publicar en internet los resultados de sus consultas al *chatbot*, internet se contaminará aún más con mentiras y noticias falsas: antes sólo los humanos las emitíamos, ahora lo hace también ChatGPT.

### *¿Es ChatGPT un virus salvaje?*

Paul Kedrosky (Loizos, 2022) compara el lanzamiento de ChatGPT con la liberación de un virus que tie-



ne muchos beneficios, pero también peligros y daños ocultos. Además, este virus tiene la capacidad de mejorarse cuando es corregido por las personas, dado que va absorbiendo todo lo que se le da, aprendiendo cada vez más, avanzando sector por sector. “Parece que podría comerse el mundo” (Loizos, 2022).

### *OpenAI tiene todo el poder*

Un gran poder conlleva una gran responsabilidad, y OpenAI tiene mucho poder (Wu, 2023). Ésta es una de las primeras empresas de IA en sacudir verdaderamente al mundo no con uno, sino con múltiples modelos de IA generativos, incluidos Dall-E 2, GPT-3 y GPT-4.

OpenAI elige qué datos se utilizan para entrenar ChatGPT, pero esta información no está disponible para el público. Simplemente no conocemos los detalles sobre cómo se entrena el modelo, qué datos se usaron, de dónde provienen ni cuáles son los detalles de su arquitectura.

\*\*\*

En resumen, mucho de lo que la herramienta responde ante las preguntas de los usuarios concuerda con la información disponible en internet, pero también ChatGPT inventa respuestas que parecen razonables y revuelve lo cierto con sus mentiras (“alucinaciones”). Si el usuario no conoce el tema, se “traga” la respuesta entera. Si lo conoce, puede decirle qué parte está mal, y así ChatGPT aprende más a partir de las personas que lo corrigen.

### ■ **Gran uso de ChatGPT**

■ GPT-3 está siendo usado para multitud de propósitos. Además, montadas sobre GPT-3, GPT-4 y parecidos, están apareciendo y se desarrollarán herramientas especializadas para áreas específicas, que agregarán más conocimiento en cada campo. Algunos ámbitos en los que ChatGPT ayuda son:

#### *Educación*

- Aprendizaje personalizado: personalizar y adaptar la experiencia de aprendizaje a las necesidades individuales de cada estudiante (K, s/f).



- Aprendizaje de idiomas: Duolingo Max, lecciones de lenguaje personalizadas.
- Asistencia en la escritura.
- Apoyo en la investigación.
- Preparación de exámenes.
- Asistentes de enseñanza virtuales.
- Gamificación.
- Accesibilidad.
- Simulaciones y conversaciones con personajes históricos.
- Desarrollo profesional.

### Negocios

- Aprendizaje personalizado.
- Entrenamiento.
- Productividad: los integrantes del equipo obtienen la información que necesitan cuando requieren.
- Automatización: generación automática de preguntas, respuestas, evaluaciones y cuestionarios basados en conocimientos a partir del contenido existente.
- Experiencia: a través de un asistente virtual, en cualquier lugar y en cualquier momento.
- Herramientas para escribir mejor (Distel, 2022).
- Optimización de la cadena de suministro: analizando los patrones de ventas.

### Finanzas

- Atención al cliente y experiencias (Martinez, 2023; Lamaj, s/f).
- Procesamiento de documentos.
- Asesoría financiera personalizada.
- Procesamiento de préstamos.
- Detección de fraudes.
- Análisis y predicción de inversiones.
- Análisis financiero.
- Cumplimiento y gestión de riesgos (Talerico, 2023).

### Programación

- Entiende código: por ejemplo, Python (Anand, 2020).
- Diseña código: por ejemplo, plantillas web.
- Genera expresiones regulares: regex, etcétera.



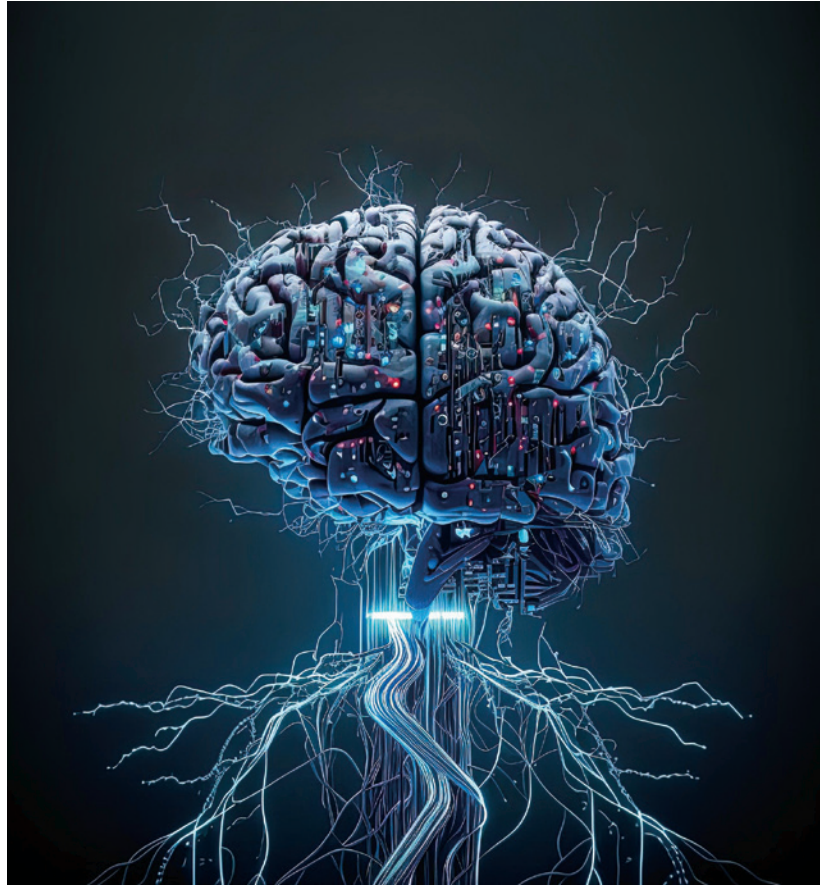
## Medicina

- Del diagnóstico al descubrimiento: en la investigación médica, dado lo avanzado del procesamiento de lenguaje natural de GPT-3, puede comprender e interpretar información médica, lo que hace posible analizar a un paciente y llevar a cabo tareas como: análisis de datos, generación de hipótesis, medicina personalizada, entre otras (Dev, 2023). La ventaja es tener una mayor precisión.
- Descubrimiento de medicamentos: GPT-3 puede analizar la información de la literatura científica y otras fuentes. Así, puede ayudar al descubrimiento de nuevos objetivos farmacológicos. Por ejemplo, al escanear grandes cantidades de información, GPT-3 puede identificar patrones y establecer conexiones que podrían no aparecer de inmediato para los investigadores humanos.
- Diseño de ensayos clínicos: GPT-3 puede ayudar a mejorar el diseño de ensayos clínicos.
- Desarrollo de fármacos: la capacidad de GPT-3 para predecir estructuras y propiedades moleculares se puede utilizar en el desarrollo de fármacos para generar compuestos químicos sintéticos, predecir la farmacocinética y los perfiles de toxicidad. Así, las aplicaciones de GPT-3 en el cuidado de la salud pueden ayudar a mejorar la formulación de fármacos y los regímenes de dosificación, así como a identificar los posibles efectos adversos antes de que comiencen los ensayos clínicos. Esto ayuda a mejorar la seguridad y la eficacia de los nuevos medicamentos.

### **En manos de grandes empresas tecnológicas (Big Tech)**

Las empresas están ansiosas de explotar las “ventajas” de ChatGPT y GPT-4 para ofrecer productos y servicios especializados. Quizá exagerarán las bondades de sus productos y minimizarán sus problemas. A partir de esto, esperan tener una gran bonanza económica, no obstante los peligros ya mencionados.

Nos dice Melissa Heikkilä (2023) en *MIT Technology Review*:



Si los reguladores no actúan ahora, el auge de la IA generativa concentrará aún más el poder de las *Big Tech*. Ése es el argumento central de un nuevo informe del instituto AI Now [un instituto de investigación sin fines de lucro]. Y tiene sentido. Para entender por qué, considere que el auge actual de la IA depende de dos cosas: grandes cantidades de datos y suficiente poder de cómputo para procesarlos. Ambos recursos sólo están realmente disponibles para las grandes empresas. Y aunque algunas de las aplicaciones más emocionantes, como el chatbot ChatGPT de Open IA y la IA de generación de imágenes Stable Diffusion de Stability.AI [así como el caso de Duolingo Max], son creadas por nuevas empresas [startups], dependen de acuerdos con las *Big Tech* que les dan acceso a sus vastos recursos informáticos y de datos.

Melissa Heikkilä cita a Sarah Myres West, directora gerente del instituto AI Now: “Un par de empresas *Big Tech* están preparadas para consolidar su poder a través de la IA, en lugar de democratizarlo”.

*Un competidor que puede vencerlo*

En un artículo publicado en marzo de 2023, investigadores del tema de IA de la Universidad de Stanford y el instituto canadiense para IA, nombrado MILA, propusieron una tecnología que podría ser mucho más eficiente que GPT-4 o *software* similar, para engullir grandes cantidades de datos y transformarlos en una respuesta. Se llama Hyena. Ya veremos si resulta vencedora (Ray, 2023).

En resumen, éste es un caso en el que la investigación en IA continuará en manos de las empresas *Big Tech*. El sector académico generará poca investigación de vanguardia, debido a los grandes recursos de cómputo que se necesitan para analizar los enormes volúmenes de datos de entrenamiento. La evidencia sugiere que la IA aplicada al análisis de textos seguirá en manos privadas.

**Regulación**

Se espera un gran *boom* y muchas exageraciones comerciales: todo el mundo apresurándose a sacar el mejor provecho de esta herramienta de la IA (Heikkilä, 2023). Afortunadamente, ahora tenemos una mejor comprensión de todas las formas catastróficas en que la IA puede fallar. Los reguladores de todo el mundo están prestando mucha atención. Por ejemplo, más de diez mil miembros del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) firmaron la solicitud “Pausar experimentos gigantes de IA” en la que expresan su preocupación y piden una moratoria de seis meses (Anderson, 2023).

Con respecto a cómo debe regularse, el informe de AI Now argumenta que la propuesta de la Casa Blanca de abordar la responsabilidad de la IA con medidas posteriores al lanzamiento de productos, como auditorías algorítmicas, no es suficiente para mitigar los posibles daños de la IA. Sarah Myres West señala: los reguladores deben actuar rápidamente; “debe haber consecuencias cuando [las empresas de tecnología] violan la ley” (Heikkilä, 2023). En resumen, los gobiernos deben establecer regulaciones sobre los entes y las empresas que generen noticias falsas o engañosas, o que desarrollen herramientas capaces de producirlas.

**Conclusión**

ChatGPT aprende sobre lo que sucede y sucedió en el mundo mientras va leyendo y “digiriendo” una gran cantidad de conocimientos, tomados de Wikipedia, internet, grandes bases de datos... Para que sus transformadores los sinteticen y generalicen, requieren mucho poder de procesamiento. Durante su

**Recomendaciones**

**A los usuarios de la herramienta:**

- “No creas todo lo que te dijeron”.
- Úsalo como un buen ayudante, pero verifica.

**A los gobiernos:**

- Establezcan regulaciones sobre la producción de noticias falsas o engañosas, así como de las herramientas que las producen.



entrenamiento, hay personas (“tutores”) que le corrigen las respuestas malas. Los seres humanos aprendemos de esta misma manera, excepto que la cantidad de información que procesamos y guardamos es mucho menor, y también lo es nuestra velocidad de procesamiento. No usamos (supongo) transformadores.

También nosotros hacemos deducciones probables, quizá incorrectas: si no conocemos cuántos hijos tuvo Benito Juárez, suponemos que fueron cinco, dado que este oaxaqueño vivió en el siglo XIX. Nosotros nos percatamos cuando “estamos en lo cierto” (porque obtuvimos el dato de una fuente que suponemos confiable) o si estamos haciendo una estimación estadística. ChatGPT no puede detectar eso, únicamente aplica sus generalizaciones y muestra el

resultado, pero no se da cuenta de que está mal. Sin embargo, tal como sucede con nosotros, un tutor o un usuario lo puede corregir, y así errará cada vez menos. Nótese que mientras más personas lo corrijan, mejores serán sus respuestas, pero sus errores o mentiras serán más difíciles de detectar.

*Caveat:* he tratado de citar todas las fuentes en las que me basé para hacer este trabajo.

### Adolfo Guzmán Arenas

Centro de Investigación en Computación, Instituto Politécnico Nacional.

aguzman@ieee.org

### Referencias específicas

- Agomuoh, F. (27 de enero de 2023), “The 6 biggest problems with ChatGPT right now”, *Digital Trends*. Disponible en: <https://tinyurl.com/ProblemasPrecision>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Anand, A. (28 de septiembre de 2020), “Deep Learning Trends: top 20 best uses of GPT-3 by OpenAI”, *Educative*. Disponible en: <https://tinyurl.com/UsEduc>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Anderson, M. (7 de abril de 2023), “‘AI Pause’ Open Letter Stokes Fear and Controversy”, *IEEE Spectrum*. Disponible en: <https://tinyurl.com/CartaEspera>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Dev, P. (16 de febrero de 2023), “The impact of GPT-3 in healthcare, pharma, medical research, and diagnosis”, *Accubits Blog*. Disponible en: <https://tinyurl.com/UsMedico>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Distel, A. (26 de noviembre de 2022), “The 16 Best GPT-3 Tools To Help You Write Faster”, *Jasper*. Disponible en: <https://www.jasper.ai/blog/gpt3-tools>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Heikkilä, M. (19 de abril de 2023), “OpenAI’s hunger for data is coming back to bite it”, *MIT Technology Review*. Disponible en: <https://tinyurl.com/LeyProtegeDatos>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Hetler, A. (2023), “Definition. ChatGPT”, *TechTarget*. Disponible en: <https://tinyurl.com/AsiTrabaja>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- K, M. (s/f), “10 Practical Ways Educators Can Use GPT-3 for Enhanced Learning in and Beyond the Classroom”, *Noodle Factory*. Disponible en: <https://tinyurl.com/UsEducacion>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Lamaj, D. (s/f), “The 3 Best GPT-3 Tools and How to Use Them in Marketing”, *Publer*. Disponible en: <https://publer.io/blog/best-gpt3-tools/>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Loizos, C. (9 de diciembre de 2022) “Is ChatGPT a ‘virus that has been released into the wild?’”, *TechCrunch*. Disponible en: <https://tinyurl.com/WildVirus>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Martinez, C. (7 de marzo de 2023), “50 Ways to use Chat GPT-3 in Finance, FP&A and Investing. Part 4”, *Medium*. Disponible en: <https://tinyurl.com/UsFinanzas>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Ortiz, S. (15 de marzo de 2023), “What is GPT-4? Here’s everything you need to know”, *ZDnet*. Disponible en: <https://www.zdnet.com/article/what-is-gpt-4-heres-everything-you-need-to-know/>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Ray, T. (20 de abril de 2023), “This new technology could blow away GPT-4 and everything like it”, *ZDnet*. Disponible en: <https://tinyurl.com/QuizaHyena>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Talerico, A. (24 de febrero de 2023), “How Finance and Banking Professionals Can Use ChatGPT”, *Corporate Finance Institute*. Disponible en: <https://tinyurl.com/UsRiesgo>, consultado el 15 de mayo de 2023.
- Wu, G. (6 de mayo de 2023), “8 Big Problems With OpenAI’s ChatGPT”, *Make Use Of*. Disponible en: <https://tinyurl.com/ProblemasGPT>, consultado el 15 de mayo de 2023.

# Novedades científicas desde la Universidad Autónoma Metropolitana

Las profesoras y los profesores de la Universidad Autónoma Metropolitana llevan a cabo investigaciones de vanguardia e interdisciplinarias en muy diversos campos. En este artículo presentamos cinco diferentes proyectos en la frontera de sus respectivas disciplinas, los cuales contribuyen al desarrollo regional y nacional, además de su gran potencial para tener una contundente incidencia social.

**E**n el presente artículo compartimos cinco investigaciones de vanguardia que se llevan a cabo en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) y que presentan alternativas con un impacto ambiental o social. Dos de estos proyectos fueron ganadores del Premio a la Investigación 2022 de nuestra institución.

Los primeros dos se han desarrollado para revertir algunos efectos negativos en el ambiente y la salud, ya que ayudan a remover metales pesados que son tóxicos para los humanos. El primero es un filtro, construido con materiales de bajo costo, que limpia la red de agua potable y que se ha probado en la alcaldía Iztapalapa. El segundo tiene como objetivo reducir los residuos minerales tóxicos en el entorno mediante una cobertura planta-hongo cuya simbiosis permite a la flora local absorber metales pesados; esto ha apoyado a la restauración ambiental en Zacatecas.

En tanto, otros dos proyectos que presentamos se basan en el análisis de las señales eléctricas extraídas mediante electrodos colocados en los organismos bajo observación. Por un lado, se aborda la respuesta de las plantas ante estímulos bióticos, cuya detección permitiría controlar dispositivos electrónicos. Por otro lado, se comparte un nuevo método de seguimiento fetal no intrusivo que posibilita discernir con claridad entre las señales cardíacas de la madre y del feto.

Por último, también con incidencia en el ámbito de la salud, se han hecho estudios de diferentes redes neuronales en el cerebro para encontrar marcadores biológicos tempranos que ayuden a detectar alteraciones cognitivas en la población.



## **Calidad del agua potable y remoción de contaminantes**

Uno de los mayores problemas de salud pública en el mundo se deriva de la mala calidad del agua potable y la falta de recursos para su tratamiento efectivo. Con el



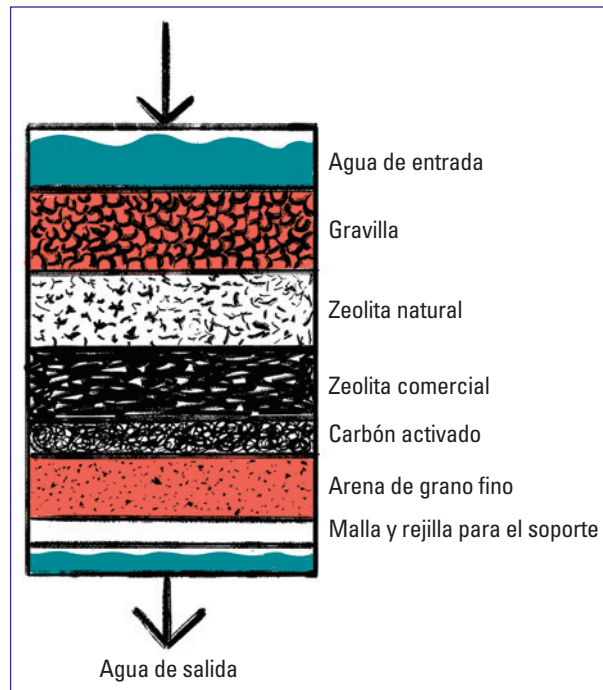
fin de satisfacer la alta demanda de la población, el agua se ha extraído de los mantos acuíferos localizados cada vez a mayores profundidades. Por ello es importante determinar la calidad del agua en aquellos sitios que han presentado graves problemas de contaminación y que pueden comprometer a largo plazo la salud de la población que la consume.

Una de estas zonas es Iztapalapa, en Ciudad de México, donde casi 75% del agua que recibe la población proviene de pozos. En esta alcaldía estudiamos la calidad del agua de extracción de 34 pozos y encontramos que, de entre los parámetros analizados, las concentraciones de hierro y manganeso demostraron ser un factor determinante para el aspecto del agua. Las concentraciones elevadas de ambos elementos se deben a la contaminación del acuífero por la extracción excesiva del recurso, así como a las actividades antropogénicas, también por la falta de mantenimiento para subsanar la corrosión y el daño en las tuberías, además de las afectaciones por el sismo de septiembre de 2017, que creó fracturas en los pozos de abastecimiento del agua. En nuestros resultados obtuvimos concentraciones de 0.02-2.36 mg/l para el hierro y de 0.3-1.3 mg/l para manganeso, cuyos valores son superiores a los límites máximos permitidos por la Norma Oficial Mexicana (NOM-127-SSA1-2021), que indica los valores de 0.3 mg/l para el hierro y 0.15 mg/l para el manganeso.

#### Remoción de hierro y manganeso con zeolitas

Una vez identificados los problemas de calidad del agua, es necesario buscar una forma económica de remover los contaminantes presentes. En particular, el uso de zeolitas es una opción de bajo costo: las propiedades físicas de estos minerales –compuestos por aluminio, silicio, sodio, calcio, magnesio, potasio y agua– les proveen aspectos únicos para una amplia variedad de aplicaciones prácticas, como ser materiales adsorbentes de metales pesados. Además, las zeolitas abundan en varios estados del país y presentan una buena eliminación de los iones disueltos en el agua.

En aplicaciones comerciales se han modificado las zeolitas con óxidos de manganeso para la adsorción del manganeso, que previamente debe ser oxi-



**Figura 1.** Diseño de un filtro para remover el hierro y manganeso del agua proveniente de pozos de la alcaldía Iztapalapa. Crédito: Diego de la Vega y Judith Cardoso Martínez.

dado con cloro. Para eliminar los contaminantes, diseñamos un filtro multicapas (véase la Figura 1) cuyo funcionamiento consistió en hacer pasar el agua a través de un lecho poroso de arena con diferentes tamaños de grano (gravilla); luego, una capa de zeolita natural que, debido a su mayor afinidad al hierro, lo removería en mayor cantidad; además de una capa de zeolita comercial recubierta con óxido de manganeso; a continuación, una capa de carbón activado para eliminar el color, el olor y modificar el pH a valores permitidos por la norma; por último, una capa de arena fina. Con el filtro propuesto se removió 92% del hierro y 75% del manganeso; en consecuencia, pudimos obtener agua de mejor calidad para uso doméstico.

#### Plantas y hongos para reducir el impacto de los residuos mineros tóxicos

La minería produce a diario millones de toneladas de residuos en forma de polvos y arenas que por lo general contienen elementos que son potencialmente tóxicos, tales como plomo, cadmio, zinc, cobre

y arsénico. Los residuos mineros, al ser depositados a cielo abierto, llegan hasta cuerpos de agua, suelos fértiles, la atmósfera, los ecosistemas, los cultivos agronómicos... y, en consecuencia, a todos los seres vivos. Asimismo, estos sustratos en general poseen una baja capacidad de retención de agua y son pobres en nutrientes fundamentales para las plantas. Dado que México es un país eminentemente minero desde siglos atrás, en su territorio están presentes numerosos sitios con residuos acumulados en forma desordenada y expuestos a la intemperie (véase la Figura 2), por lo que la lluvia y el viento pueden transportar estos materiales tóxicos por grandes distancias.

La investigación que llevamos a cabo en la UAM reporta que hay diferentes especies vegetales con hongos asociados a sus raíces que habitan y toleran los residuos mineros, a pesar de las condiciones inhóspitas. Esta cobertura planta-hongo almacena los elementos potencialmente tóxicos dentro de sus cé-

lulas o los estabiliza en el ambiente edáfico (o de residuos mineros) gracias a moléculas liberadas, lo que frena la dispersión eólica e hídrica de los materiales y reduce el impacto negativo en el entorno inmediato y lejano. Asimismo, la actividad fisiológica de las plantas y hongos transforma a un ritmo paulatino las condiciones agrestes de los residuos en unas menos inhóspitas, además de que aumenta la diversidad y abundancia de organismos y mejora el funcionamiento de este “ambiente antrópico”.

Recientemente, se integró una colección de 61 hongos microscópicos, pioneros en residuos mineros contaminados con plomo, cadmio y arsénico en Zacatecas. Estos hongos interactúan con las raíces de las plantas, donde pueden desempeñar funciones importantes como la estimulación del crecimiento vegetal, la descomposición de la materia orgánica, el aporte de nutrientes al ambiente y la acumulación celular de elementos potencialmente tóxicos. Además, ciertos hongos son productores relevantes de



**Figura 2.** Residuos mineros con presencia de elementos potencialmente tóxicos (cadmio, plomo y arsénico), cercanos a poblaciones humanas en los estados de Michoacán (izquierda y centro superior) y Zacatecas (inferior izquierda y derecha). Se aprecian áreas con cobertura vegetal y áreas sin vegetación. En un medio de cultivo (superior derecha) se aislaron algunos hongos microscópicos procedentes de la proximidad de las raíces. Crédito: Facundo Rivera-Becerril y Diego de la Vega.

metabolitos novedosos que se pueden emplear como compuestos antimicrobianos y herbicidas, según los hallazgos de este estudio. En suma, los hongos y las plantas son herramientas centrales para enfrentar uno de los problemas causados por la minería; en este sentido, nuestra investigación busca utilizarlos en procesos de restauración ambiental de residuos tóxicos, como ya hemos probado en Zacatecas.

### ■ Interfaces planta-computadora con biosensores

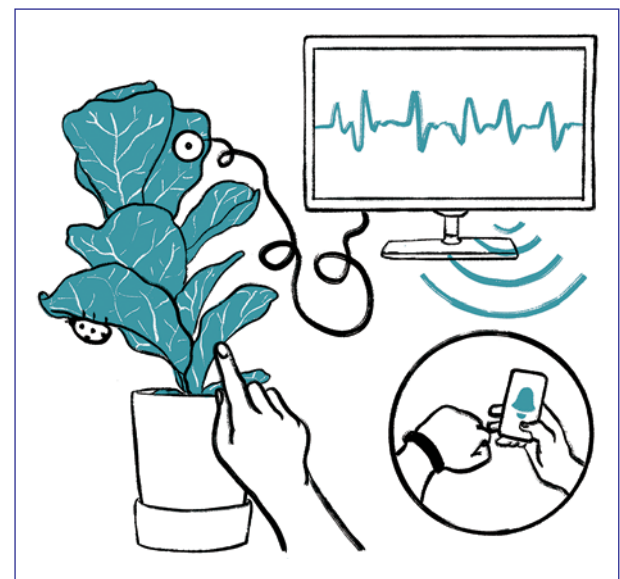
■ La fisiología de las plantas les permite identificar diversos estímulos, ya sean bióticos (herbívoros y patógenos) o abióticos (dióxido de carbono, oxígeno, ozono, temperatura, humedad relativa, nutrientes, salinidad, presión atmosférica, gravedad, sonidos, campos eléctricos y magnéticos, etc.), en un entorno dinámico. Éstos afectan el funcionamiento de las plantas de diferentes maneras y provocan respuestas inmediatas o por periodos más prolongados. En particular, es posible simular algunos estímulos bióticos, como cuando un herbívoro muerde una planta o cuando un polinizador se posa sobre una flor, mediante un estímulo mecánico, ya sea al tocar o al presionar la planta.

Algunas de las estructuras que ayudan a las plantas a identificar los estímulos mecánicos son los tricomas, el citoesqueleto y la tigmomorfogénesis. Los tricomas están en las hojas o en los tallos y son sensibles al movimiento de los insectos o al de la caída de la lluvia. Al tocar un tricoma, se genera una señal eléctrica, la cual se esparce por los tejidos vegetales. Otros sensores se encuentran en distintas partes de la célula y reaccionan dependiendo del impacto que sufren, ya sea sutil o fuerte. Se ha sugerido que, en caso de impactos sutiles, algunos elementos de la pared celular actúan como los sensores que primero perciben el estímulo, debido a su posición más externa en la célula. En caso de que haya un impacto relativamente fuerte que afecte a toda la célula, los filamentos que forman su esqueleto pueden actuar como sensores. Por otro lado, la tigmomorfogénesis se percibe como una respuesta lenta, tanto eléctrica como morfológica, a la perturbación mecánica.

En tanto, las plantas cuentan con mecanismos (como señales hidráulicas, químicas o eléctricas) pa-

ra producir una respuesta ante el estrés que les provocan los estímulos. En particular, una manera indirecta de estudiar dichas respuestas es medir las corrientes eléctricas. Estas señales pueden utilizarse para el monitoreo de la electroquímica atmosférica, lluvia ácida, pesticidas, luz y contaminantes, o bien como sensores de iluminación, tacto o proximidad.

En la UAM analizamos, caracterizamos e interpretamos las señales eléctricas de diferentes plantas bajo diversos estímulos con el objetivo de construir biosensores y dispositivos electrónicos, conocidos como interfaces planta-computadora (véase la Figura 3). Por ejemplo, hay plantas como la *Mimosa pudica* que, al ser tocadas, lanzan una corriente eléctrica muy característica que puede interpretarse como una señal de encendido o apagado; de esta manera, puede indicarle a un dispositivo que debe encender o apagar un foco, o bien abrir o cerrar una puerta, por mencionar algunos ejemplos de aplicación. Además, buscamos desarrollar distintos biosensores de bajo costo, por ejemplo, para construir dispositivos que nos alerten que una zona presenta altos índices de contaminación, y que también reaccionen ante las necesidades de la planta, como puede ser un sistema de riego automático que use la propia información de la planta.



**Figura 3.** Interfaces planta-computadora: la diferencia de potencial detectada a partir de un estímulo táctil (por ejemplo, una plaga que afecta a una planta o una persona que la toca) puede ser interpretada para que un dispositivo electrónico (como un celular) lleve a cabo una instrucción. Crédito: Diego de la Vega y Montserrat Alvarado González.

### ■ Seguimiento fetal, ¿sin usar ultrasonido?

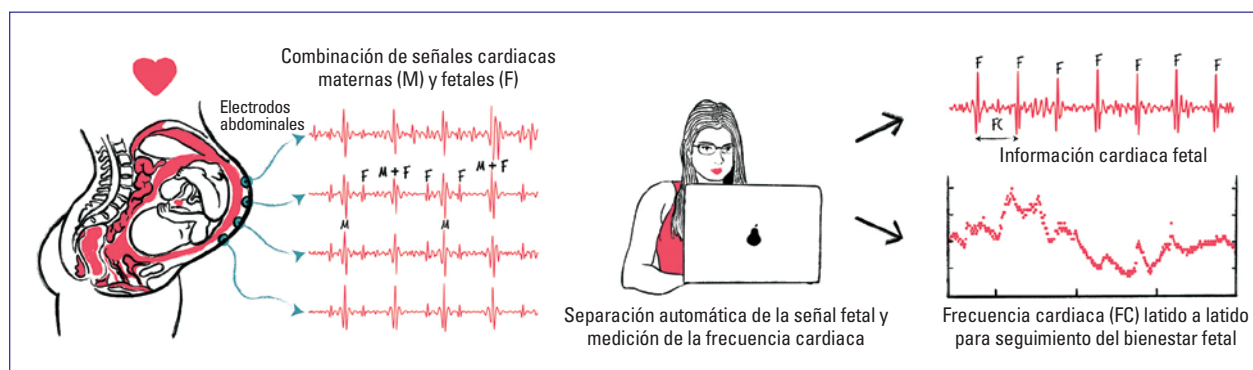
■ ¿Es posible inferir la información que aporta el estudio de ultrasonido durante el embarazo sin usar este tipo de equipo intrusivo? Entre otras cosas, el seguimiento fetal sirve para identificar la escasez de oxígeno sanguíneo en el feto, un factor que restringe su desarrollo y limita su capacidad para soportar el estrés del trabajo de parto. Para ello se utiliza un equipo de ultrasonido, que le permite al especialista obstetra estudiar las variaciones en la frecuencia cardíaca, la distribución del flujo sanguíneo y los movimientos fetales para, con ello, inferir el grado de desarrollo fetal (o bienestar) y, entonces, clasificar al embarazo como de bajo o alto riesgo.

Sin embargo, el mayor peligro del seguimiento hecho con ultrasonido es que la energía ultrasónica aplicada puede provocar un calentamiento y lesionar el tejido fetal. Como consecuencia, este estudio no puede realizarse con la frecuencia y la duración deseables para garantizar que puedan identificarse todos los factores que apunten a un problema de oxigenación. Quizás por eso no se ha logrado reducir significativamente el número de muertes fetales, incluso en países más desarrollados. No obstante, una alternativa que nos puede aportar esta información para el seguimiento fetal consiste en colocar unas placas metálicas (conocidas como electrodos) sobre el abdomen materno. También conocida como electrocardiografía abdominal, esta técnica trabaja sin aplicar energía al feto, así que podría usarse frecuentemente y por tiempos prolongados, sin representar riesgos.

Las señales obtenidas, como se observa del lado izquierdo de la Figura 4, son combinaciones de la información cardíaca tanto fetal como materna, así que deben separarse, lo cual implica un reto y debe realizarse conforme se va obteniendo la señal. Ahí entra en acción nuestro trabajo de investigación, que busca quitar la información perteneciente a la señal materna de una manera correcta, rápida y automática, mediante el desarrollo una herramienta computacional. Después, a partir de la señal fetal recuperada, como se muestra del lado derecho de la Figura 4, es posible medir la frecuencia cardíaca fetal de manera continua y, por último, presentarle el resultado al obstetra para que determine si hay riesgo para el feto por problemas de oxigenación.

### ■ El cerebro en reposo y las alteraciones cognitivas

■ Las técnicas de neuroimagen han revolucionado la forma de investigar las bases neurobiológicas del procesamiento cognitivo, que nos permiten conocer cuándo y cómo se activan las regiones del cerebro. Uno de los fenómenos cognitivos que ha resultado muy interesante para su estudio es el estado en reposo (reposo cognitivo) cuando no estamos haciendo ninguna tarea. Las investigaciones de dicho estado han establecido que el cerebro posee una organización funcional compleja que se estructura mediante redes en diferentes áreas del cerebro, y la cual compartimos los seres humanos con otras especies. Las redes son áreas que siempre están conectadas entre sí, aunque de manera individual se activan o inacti-



**Figura 4.** Mediante cuatro detectores (electrodos) se obtienen las señales cardíacas de la madre (M) y del feto (F); en el momento, la información se separa para dar seguimiento a la condición fetal. Créditos: Diego de la Vega y Aída Jiménez González.

van de forma completa al mismo tiempo. Sus diferencias están en las estructuras que las componen y en las actividades cognitivas que habilitan.

En la UAM utilizamos el reposo cognitivo, en conjunto con la resonancia magnética, para estudiar los patrones de conectividad cerebral durante este estado en tres redes cerebrales específicas que dejan entrever posibles alteraciones cognitivas. Los estudios nos muestran cómo están conectadas al interior dichas redes: pueden tener alta conectividad (hiperconectadas) o baja conectividad (hipoconectadas). Esto sirve para conocer qué tanto se comunican al interior durante el reposo, y saber si alguna estructura dentro de cada red es más importante que las demás en diferentes procesos cognitivos.

En particular, hemos estudiado tres redes diferentes (véase la Figura 5): la red por defecto (RD), que habilita los procesos de mentalización (por ejemplo, divagar); la red de saliencia (RS), que detecta los estímulos en el entorno; y la red ejecutiva central (REC), que activa conductas voluntarias de procesos cognitivos (por ejemplo, poder enfocarse para habilitar otros procesos). Se ha sugerido que la hiper o la hipoconectividad, la relevancia o la centralidad de cada estructura que pertenece a cada red, y la forma en que se transmite la información, son marcadores biológicos de la integridad en el procesamiento cerebral.

Una de nuestras investigaciones se centra en pacientes con enfermedad de Parkinson, en quienes

encontramos que la conectividad de su RS se encuentra disminuida. Dicha reducción explica un bajo desempeño en tareas de memoria. Adicionalmente, estamos investigando si la actividad espontánea de la RS en estos pacientes permite detectar de manera precisa la presencia de un deterioro cognitivo.

En otra investigación exploramos la RD durante la inducción de un estado afectivo negativo en pacientes con obesidad, para ver si se puede detectar la producción de un patrón de conectividad específico durante el estado en reposo. En otras palabras, buscamos saber si el paciente con un estado de ánimo negativo previo al estado de reposo mantiene el mismo estado de ánimo en un momento inmediato posterior. Este patrón podría ser un marcador biológico de un mecanismo cognitivo que se encuentra detrás de las alteraciones afectivas de dicha población, como el incremento en rasgos de ansiedad y depresión.

Por otro lado, en uno de nuestros proyectos buscamos el posible papel adverso del cabeceo intencional en jugadores de fútbol, ya que se ha asociado a la presencia de alteraciones neuropsicológicas. En este sentido, pensamos que las señales de la dinámica en las tres redes (RD, RS y REC) permitiría detectar a aquellos deportistas que son más susceptibles a tener efectos adversos como, por ejemplo, alteraciones en el desempeño de funciones básicas como la atención y la memoria. En resumen, el interés por caracterizar estas tres redes cognitivas en reposo radica en su

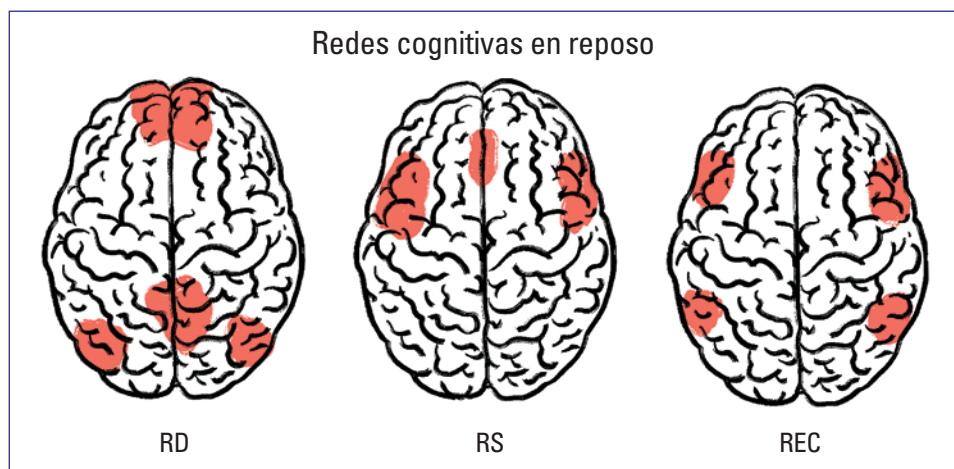


Figura 5. Redes cognitivas en reposo: red por defecto (RD), red de saliencia (RS) y red ejecutiva central (REC).



potencial como marcadores biológicos tempranos y sutiles de las alteraciones cognitivas presentes en algunas poblaciones.

**Judith Cardoso Martínez**

UAM Iztapalapa.  
jcam@xanum.uam.mx

**Facundo Rivera Becerril**

UAM Xochimilco.  
frivera@correo.xoc.uam.mx

**Montserrat Alvarado González**

UAM Cuajimalpa.  
aalvarado@cua.uam.mx

**Aída Jiménez González**

UAM Iztapalapa.  
aidaj@xanum.uam.mx

**César Romero Rebollar**

UAM Lerma.  
c.romero@correo.ler.uam.mx

**Mario A. de Leo Winkler**

UAM Rectoría General.  
madeleowinkler@correo.uam.mx

Judith Cardoso Martínez escribió la sección “Calidad del agua potable y remoción de contaminantes”; Facundo Rivera Becerril, “Plantas y hongos para reducir el impacto de los residuos mineros tóxicos”; Montserrat Alvarado González aportó la sección “Interfaces planta-computadora con biosensores”; Aída Jiménez González, “Seguimiento fetal, ¿sin usar ultrasonido?”; y César Romero Rebollar, “El cerebro en reposo y las alteraciones cognitivas”. Las investigaciones de Aída Jiménez González y de Facundo Rivera Becerril recibieron el Premio a la Investigación 2022 de la Universidad Autónoma Metropolitana.

**Lecturas recomendadas**

Correa, S. (2021), “La resonancia magnética de 3 Teslas –RM 3T– es capaz de analizar el funcionamiento del cerebro en tiempo real, entre otras múltiples aplicaciones”, *Mente & Ciencia*. Disponible en: <<https://www.menteyciencia.com/resonancia-magnetica-de-3-teslas-mejoras-y-aplicaciones/>>, consultado el 10 de junio de 2023.

Montero, D. (2020), “El abastecimiento de agua en Iztapalapa. Un análisis institucional”, *Revista de Economía Institucional*, 22(43):301-321. Disponible en: <<http://www.scielo.org.co/pdf/rei/v22n43/0124-5996-rei-22-43-301.pdf>>, consultado el 10 de junio de 2023.

Organización Mundial de la Salud (2017), *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. Disponible en: <<https://www.who.int/es/publications/i/item/9789241549950>>, consultado el 10 de junio de 2023.

Roberts, M. (2011), “Fútbol: demasiados cabezazos ‘pueden dañar el cerebro’”, *BBC News Mundo*. Disponible en: <[https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/11/111129\\_dano\\_futbolistas\\_cabecear\\_cr](https://www.bbc.com/mundo/noticias/2011/11/111129_dano_futbolistas_cabecear_cr)>, consultado el 10 de junio de 2023.

Romero, S. M. (2020), *Evaluación de tres tratamientos para la remoción de hierro y manganeso presentes en el agua subterránea del acuífero Zona Metropolitana de la Ciudad de México* (tesis de maestría), México, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <<http://132.248.9.195/ptd2020/noviembre/0804999/Index.html>>, consultado el 10 de junio de 2023.

Sandoval Trejo, S. I. (2016), “Proyecto Obeteen: la obesidad es nociva para el cerebro adolescente”, *Ciencia UNAM*. Disponible en: <[https://ciencia.unam.mx/leer/554/Proyecto\\_Obeteen\\_la\\_obesidad\\_es\\_nociva\\_para\\_el\\_cerebro\\_adolescente](https://ciencia.unam.mx/leer/554/Proyecto_Obeteen_la_obesidad_es_nociva_para_el_cerebro_adolescente)>, consultado el 10 de junio de 2023.

# Desde las redes

## Estallidos cerebrales durante el fin de la vida

¿Qué sucede en el cerebro al momento de fallecer? Algunos estudios han reportado lo que parece ser una alta actividad cerebral durante el proceso de la muerte.

En 2022, con más de 500 participantes que habían recibido reanimación cardiopulmonar (RCP), investigadores de la Universidad de Nueva York encontraron que una de cada cinco personas había sufrido experiencias cercanas a la muerte (ECM) durante dicha práctica. Entre las sensaciones, describían haber experimentado la separación de su cuerpo, ver pasar imágenes de su pasado, hacer una evaluación significativa de su vida o percibir voces y luces.

Otro estudio se llevó a cabo con cuatro pacientes que se encontraban en estado de coma. Debido a que su pronóstico neurológico era negativo, tras obtener la aprobación de sus familiares y de un comité de bioética, se procedió a retirarles el soporte

vital. Durante esa etapa, el equipo de investigación monitoreó a los pacientes por medio de electroencefalograma y electrocardiograma.

Dos de las personas mostraron durante el proceso de muerte una oleada de actividad de ondas gamma, considerada la actividad cerebral más rápida y asociada con la conciencia. Estas ondas pueden indicar que diferentes regiones del cerebro están trabajando juntas para combinar sensaciones dispares en la conciencia, al unir la vista, el olfato y el sonido, por ejemplo. Otros estudios han encontrado este patrón cuando una persona sana está recordando, aprendiendo o soñando.

Los resultados ponen sobre la mesa la posibilidad de que los pacientes que experimentan un paro cardíaco —considerados en ese momento clínicamente muertos— aún pueden tener algún nivel de conciencia que no es visible o detectable de manera externa. Esto también podría explicar las experiencias cercanas a la muerte en pacientes que han sido resucitados por medio de RCP. Los hallazgos deben tomarse con cautela debido a que la muestra es pequeña, pero abren la puerta a realizar más estudios similares para conocer la base neuronal de estos momentos.



**Figura 1.** Personas que han estado cerca de la muerte han informado haber sentido que sus vidas pasan ante sus ojos. *Crédito:* Pixabay.

### Más información

Xu, G. *et al.* (2023), “Surge of neurophysiological coupling and connectivity of gamma oscillations in the dying human brain”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120 (19): e2216268120. Disponible en: <doi.org/10.1073/pnas.2216268120>, consultado el 31 de mayo de 2023.

## El cabello de Beethoven para encontrar las causas de su muerte

Un par de días después de su muerte, en 1827, dos de los allegados más cercanos de Ludwig van Beethoven encontraron entre sus pertenencias un documento redactado en 1802 en el que el compositor confesaba que pasaba por una pérdida de audición y que había experimentado la necesidad de suicidarse debido a este malestar. Además pedía que, después de su muerte, su médico, Johann Adam Schmidt, describiera su enfermedad y la hiciera pública. Durante muchos años sus biógrafos se han enfrentado en extensos debates para dilucidar las causas del fallecimiento y la sordera que experimentó este famoso músico y, en algunos casos, la ciencia ha analizado diversos restos asociados a Beethoven, aunque de autenticidad desconocida.

En fechas recientes, un nuevo estudio examinó ocho mechones de pelo que se consideraba que provenían del genio de Bonn. Por medio de análisis genómicos, en los que se perfeccionaron métodos de secuenciación de ADN antiguo en muestras de cabello, se determinó que sólo cinco de ellos pertenecían a la misma persona y eran auténticos.

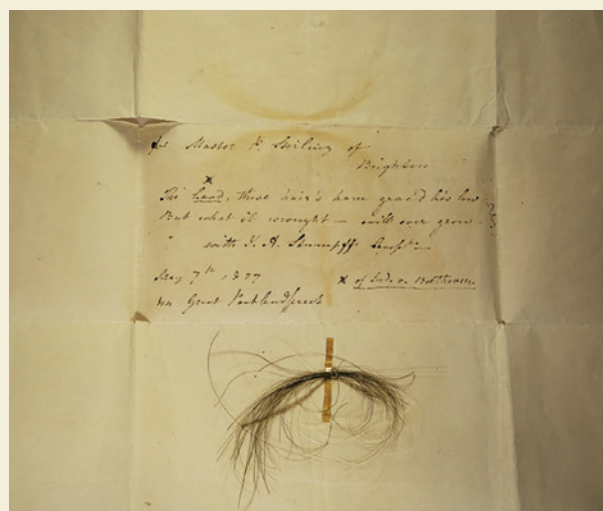
Aunque no se pudo determinar una relación con su deterioro auditivo, se encontró que el compositor

tenía una predisposición genética a presentar padecimientos hepáticos. Según los resultados, poseía dos copias de una variante del gen PNPLA3, que se ha relacionado con la cirrosis hepática, así como variantes del gen HFE, causante de hemocromatosis hereditaria, una afección que daña el hígado. Además, se demostró que tuvo una infección del virus de la hepatitis B al menos durante los meses anteriores a su muerte. Esto, ligado a un posible alto consumo de alcohol, pudo desencadenar padecimientos crónicos que deterioraron su salud.

Se sabe que el compositor alemán también vivió episodios de padecimientos gastrointestinales, aunque no se pudo determinar cuál fue el desencadenante, pero se pudieron descartar como causas la enfermedad celíaca y la intolerancia a la lactosa. Además, se halló que era poco probable que se tratara del síndrome del intestino irritable.

### Más información

Begg, T. *et al.* (2023), "Genomic analyses of hair from Ludwig van Beethoven", *Current Biology*, 33(8):1431-1447. Disponible en: <[doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.041](https://doi.org/10.1016/j.cub.2023.02.041)>, consultado el 31 de mayo de 2023.



**Figura 2.** El mechón Stumpff, del que se secuenció el genoma de Beethoven en este estudio, adherido a una carta de Johann Andreas Stumpff a Patrick Stirling, fechada el 7 de mayo de 1827. Fuente: Kevin Brown, miembro de la American Beethoven Society.

## Bacterias árticas contra los plásticos

En 2020 se produjeron en el mundo más de 300 millones de toneladas de plásticos. Aunado a las cantidades de las décadas anteriores, su presencia en el ambiente debido al uso excesivo y a la mala gestión de los residuos está provocando graves problemas a los ecosistemas y a la salud de diferentes organismos, incluidos los humanos. Como una alternativa, la economía circular de los plásticos promueve la reutilización de estos productos, genera valor a partir de los residuos y evita su envío a los vertederos.

Los microorganismos son un factor clave en este ciclo, pues algunos pueden degradar estos materiales por medio de unas enzimas, que son proteínas capaces de cortar, en este caso, las cadenas poliméricas, lo que permite reciclar estos residuos. Sin embargo, una limitante es la temperatura a la que estas enzimas pueden llevar a cabo sus procesos, que suele ser por arriba de los 20 °C. Esto implica que se debe consumir energía, lo que aumenta la huella de carbono del proceso y también los costos.

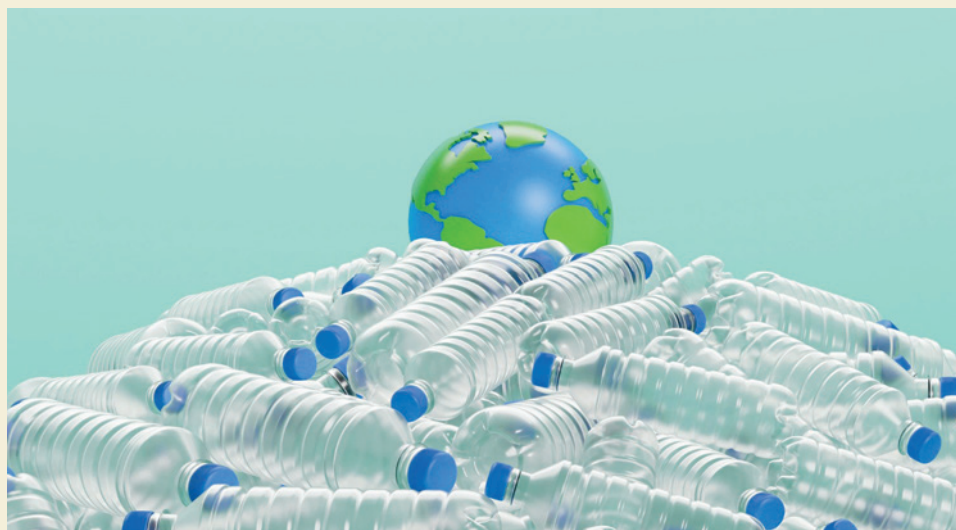
No obstante, un grupo suizo de investigación decidió salir en busca de otros organismos con enzimas que sean funcionales a temperaturas más bajas. Para ello, tomaron muestras de 19 cepas de bacterias y 15 de hongos que crecieron durante un año en plástico

suelto o enterrado intencionalmente en ambientes árticos como Groenlandia, Svalbard y Suiza. Después, los microorganismos fueron aislados y crecieron como cultivos en el laboratorio, bajo condiciones de oscuridad y en una temperatura óptima de 15 °C, aunque casi todos crecieron bien entre los 4 y 20 °C.

Ninguna de las cepas encontradas fue capaz de degradar el polietileno convencional, pero la mayoría pudo reducir algunos plásticos biodegradables. De manera singular, dos especies de hongos –de los géneros *Neodevriesia* y *Lachnellula*– fueron capaces de digerir todas las muestras de estos polímeros. A continuación, los investigadores deberán averiguar si las enzimas de estos organismos pueden trabajar a temperaturas más bajas y si, con ello, es posible desarrollar métodos para producirlas en grandes cantidades, lo que sin duda requerirá un trabajo de bioingeniería para darles una mayor estabilidad.

### Más información

Rüthi, J. *et al.* (2023). “Discovery of plastic-degrading microbial strains isolated from the alpine and Arctic terrestrial plastisphere”, *Frontiers in Microbiology*, 14: en línea. Disponible en: <[doi.org/10.3389/fmicb.2023.1178474](https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1178474)>, consultado el 31 de mayo de 2023.



**Figura 3.** Los microorganismos tienen un gran potencial para permitir una economía circular de los plásticos más sostenible. Fuente: Freepik.

# Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



## Conferencias virtuales de la AMC

Debido a la pandemia por covid-19, la AMC inauguró un ciclo de conferencias virtuales transmitidas en sus redes sociales digitales desde julio de 2020. En el programa participan investigadores en temas especializados de relevancia científica y para el país. Las conferencias más recientes, que se enlistan a continuación, son actividades enmarcadas en el Año Internacional de las Ciencias Básicas para el Desarrollo Sostenible.

- 29 de marzo de 2023

“Antioxidantes a la medida para proteger tu cerebro”

Annia Galano Jiménez, química de la UAM-Iztapalapa

[https://www.youtube.com/live/X3aw0a\\_nIno?feature=share](https://www.youtube.com/live/X3aw0a_nIno?feature=share)

- 26 de abril de 2023

“La ciencia oceánica para alcanzar el desarrollo sostenible”

Elva Escobar Briones, investigadora del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM

<https://www.youtube.com/live/WV-0MDVM9ok?feature=share>



- 31 de mayo de 2023  
“Evidencias del cambio climático hace 12 000 años y su relación con un impacto cósmico”  
Isabel Israde Alcántara, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo  
<https://www.youtube.com/live/WmB1hpzcRpQ?feature=share>

### Charlas con autores de la revista *Ciencia*

Continúan las pláticas en torno a los artículos con los que diversos autores han contribuido en diferentes números de la revista *Ciencia* de la AMC. Las charlas más recientes en las redes sociodigitales han sido:

- 14 de marzo de 2023  
“Grandes retos para *Homo sapiens*”  
Fernando Mayani, Instituto de Biología de la UNAM; Mareldi Ahumada, Clean Energy Institute de la Universidad de Washington; Héctor Mayani, Unidad de Investigación Médica en Enfermedades Oncológicas del IMSS  
<https://www.youtube.com/live/HXNXEcj8nhs>
- 21 de marzo de 2023  
“La epidemia del *matlazahuatl* en la Ciudad de México (1736-1739)”  
Martha Fernández, Instituto de Investigaciones Estéticas de la UNAM  
<https://www.youtube.com/live/V0zX8aSOYms>



- 12 de abril de 2023  
“Presentación del número ‘Nuevas tecnologías, industria 4.0. y sociedad’”  
Gabriela Dutrénit, UAM Xochimilco

- 12 de abril de 2023  
“Capacidades dinámicas y revolución digital en la manufactura mexicana”  
José Luis Sampedro, UAM Cuajimalpa  
<https://www.youtube.com/live/DdmzVboM-2Q>



- 25 de abril de 2023  
“Digitalización y automatización: ¿trabajo precario o empleos creativos?”  
Alfredo Hualde Alfaro, El Colegio de la Frontera Norte  
<https://www.youtube.com/live/4GOUnokQTZU>
- 2 de mayo de 2023  
“Inteligencia artificial y ciencia de datos en la nueva Revolución Industrial”  
Adolfo Guzmán Arenas, Centro de Investigación en Computación del IPN  
<https://www.youtube.com/live/FIPCstNtm3w>
- 16 de mayo de 2023  
“Los husos de sueño. ¿Actividad cerebral que influye en la memoria?”  
Zeidy Muñoz Torres, Facultad de Psicología, Grupo Dinámica Neural, Centro de Ciencias de la Complejidad de la UNAM  
[https://www.youtube.com/live/\\_0EMR6m8EDA](https://www.youtube.com/live/_0EMR6m8EDA)



- 23 de mayo de 2023

“La industria 4.0 y los cambios en la política industrial”

José Luis Solleiro, Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM

<https://www.youtube.com/live/xdBmAV-Kz4M>



- 6 de junio de 2023

“Retos de la transformación digital para las pymes”

Adriana Martínez Martínez, Escuela Nacional de Estudios Superiores León, UNAM

<https://www.youtube.com/live/TJRRgrjmC-A>



- 13 de junio de 2023

“Sextorsión: una nueva modalidad de corrupción”

Luis Eduardo Ramírez Sirgo, Universidad Autónoma de Tamaulipas

<https://www.youtube.com/live/rDMRLq4BEJg>



## Webinar “Tu Mundo con Ciencia”

Continúa el ciclo de conferencias “Tu Mundo con Ciencia”, impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L’Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y se transmiten por los canales de las redes sociales digitales de la AMC. Las conferencias están orientadas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar las vocaciones científicas.

- 13 de abril de 2023

“Las enfermedades que pueden transmitirnos nuestras mascotas”

Matilde Jiménez Coello, Universidad Autónoma de Yucatán

<https://www.youtube.com/live/u6XJITHm23Q>

- 11 de mayo de 2023

“Una neurona, varios medios de comunicación”

Citlali Trueta Segovia, Instituto Nacional de Psiquiatría “Ramón de la Fuente Muñiz”

<https://www.youtube.com/live/TJyS4FxKZgw>



- 8 de junio de 2023

El lado oscuro de las células troncales en cáncer

Karla Itzel Vázquez Santillán, Instituto Nacional de Medicina Genómica

<https://www.youtube.com/live/l7sdehni9co>



En nuestro próximo número  
de octubre-diciembre de 2023:

# Novedades científicas

