



ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

85
Aniversario

Novedades científicas

**Más allá de la estética, la función
del color en las flores y los frutos**

Hidrógeno verde, el combustible del futuro

Endulzando las prácticas agrícolas

La conspiración del silencio: mentir u ocultar la verdad

Nanotecnología hasta en las verduras

Esfuerzo cognitivo y democracia

**Innovaciones
tecnológicas
de la UAM**



CONSEJO DIRECTIVO
agosto 2023 – agosto 2026

Presidente

José Antonio Seade Kuri

Vicepresidenta

Telma Gloria Castro Romero

Tesorera

Gloria Soberón Chávez

Secretarios

Elva Guadalupe Escobar Briones

Sergio López Ayllón

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Noreste: Gloria María González González

Sección Noroeste: María Teresa Viana Castrillón

Sección Centro-Occidente: Alejandro De las Peñas Nava

Sección Centro-Sur: José Ramón Eguibar Cuenca

Sección Sur-Sureste: Dalila Aldana Aranda

Desde el Comité Editorial	3
<i>Alonso Fernández Guasti</i>	

Novedades científicas	
Hidrógeno verde, el combustible del futuro	6
<i>Arturo Fernández Madrigal y Nini Rose Mathews</i>	
Ventanas fotovoltaicas: el futuro de la energía solar	14
<i>Nicolás Enrique Vázquez-Barragán, Karen Rodríguez-Rosales y Francisco Javier de Moure-Flores</i>	
Potencial anticancerígeno en los desechos de camarón	20
<i>Luis Angel Cabanillas Bojórquez, Marilyn Shomara Criollo Mendoza y José Basilio Heredia</i>	
Endulzando las prácticas agrícolas	26
<i>Víctor Jesús Albores Flores, Julieta Grajales Conesa y José Alfonso López García</i>	
Nanopartículas luminiscentes y nuevos campos biotecnológicos de los lantánidos	34
<i>Luis Hernández-Adame y Gabriela Palestino</i>	
Bioetanol, biodiésel y biogás: definiciones, obtención y aplicaciones	40
<i>Martín Quintero-Mayo, Angélica Motejo-Pérez y Juan García-Contreras</i>	
Nanotecnología hasta en las verduras	48
<i>Estefanía Abigail de la Mora-Núñez, Rodrigo Díaz-Díaz y Héctor Paul Reyes Pool</i>	
Los contaminantes orgánicos persistentes en México	56
<i>Victoria Conde-Avila y Carmen Martínez-Valenzuela</i>	
El estrés vegetal: principios, aplicaciones y perspectivas	62
<i>Amanda Kim Rico Chávez y Ramón Gerardo Guevara González</i>	
Más allá de la estética, la función del color en las flores y los frutos	70
<i>Anna Gisbrecht y Laura T. Hernández-Salazar</i>	
El mundo dinámico de las mitocondrias	74
<i>César Espino de la Fuente-Muñoz y Clorinda Arias</i>	
¿De dónde provienen las células troncales pluripotentes? Una mirada a sus fuentes	82
<i>Áxel Castro Ábrego, Néstor Fabián Díaz Martínez y Guadalupe García López</i>	
Nemátodos de vida libre: diversos y en todas partes	90
<i>Maickel Armenteros</i>	
Destete eficiente, granjas porcícolas rentables	96
<i>Alonso Ortiz Luviano, Juan Fernando García Trejo y Claudia Gutiérrez Antonio</i>	
Transmisión de toxoplasmosis entre gatos y humanos	102
<i>Daniela Yaxhá Juárez Peña y Gilberto Ballesteros Rodea</i>	
La hipertensión: ¿monoterapia o terapia combinada?	108
<i>Lesly Grisel Rodríguez Chávez, Georgina Escudero Hermosillo y Mayra Cristina García Anaya</i>	
Plantas medicinales mexicanas contra la diabetes	116
<i>Nayely Leyva López, José Basilio Heredia y Erick Paul Gutiérrez Grijalva</i>	
Quetzalcoatlita: mineral descubierto en México con propiedades cuánticas	124
<i>Luis F. García Uc, Juan Hernández Tecorralco y Romeo de Coss</i>	
Esfuerzo cognitivo y democracia	130
<i>José Ramón Cossío Díaz y Herson García Gallegos</i>	
La conspiración del silencio: mentir u ocultar la verdad	136
<i>Kenlys Yera Rodríguez y Roberto Oropeza Tena</i>	

De actualidad	
Las herramientas del lenguaje y escritura automatizada de la inteligencia artificial perjudican la formación científica	145
<i>Jorge Galindo-González</i>	

Desde la UAM	
Innovaciones tecnológicas de la UAM	151
<i>Rafael Bojalil Parra y Mario A. De Leo Winkler, coordinadores</i>	

Noticias de la AMC	
	160



Portada: Pixabay.



Contraportada: Pixabay.

ciencia, revista de la Academia Mexicana de Ciencias, volumen 76, número 3, correspondiente a julio-septiembre de 2025, 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, 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 2025 volumen 76 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
Gina Zabludovsky Kuper

Editora

Rosanela Álvarez

Corrección y enlace con autores

Leticia García Urriza

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustradora

Ana Viniegra, pp. 7, 27, 71, 75, 83, 103, 117, 137, 145

Pixabay: pp. 12, 21, 25, 30, 31, 33, 35, 42, 45, 46, 58, 59, 60, 65, 67, 68, 70, 72, 96, 98, 99, 109, 118, 131, 133, 135, 139, 156

Firefly (IA generativa de Adobe): pp. 5, 11, 15, 41, 49, 54, 57, 63, 77, 78, 79, 85, 86, 87, 91, 97, 111, 112, 114, 125, 134, 142

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



@CienciaAMC

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

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Desde el Comité Editorial

Estimados lectores:

Muy bienvenidos a este nuevo número de la revista *Ciencia* que reúne una serie de Novedades científicas.

Al inicio encuentren un par de artículos relacionados con nuevas fuentes de energía renovable. El primero, titulado “Hidrógeno verde, el combustible del futuro”, nos dice que la generación eléctrica mundial se basa en el uso indiscriminado de combustibles fósiles que han causado un gran deterioro ecológico. Una de las alternativas más viables para evitar esta contaminación es el uso de energías renovables utilizando combustibles limpios como el hidrógeno verde. En el segundo texto, “Ventanas fotovoltaicas: el futuro de la energía solar”, se explora otra alternativa muy atractiva para producir electricidad mediante el uso de celdas solares. En este artículo se describen los materiales que constituyen un dispositivo solar y cómo el efecto fotovoltaico influye en la generación de corriente eléctrica.

Sigue una sección con varios artículos enfocados en la biotecnología. Continúen leyendo y descubran el potencial anticancerígeno en los desechos de camarón. Sí, los desechos de camarón son fuente de compuestos biológicamente activos que han sido ampliamente estudiados en distintos modelos de cáncer. Estos compuestos han demostrado su potencial para prevenir y disminuir el desarrollo de esta enfermedad.

¿Se les ha ocurrido que la miel puede ser útil como fertilizante? Extraño, ¿verdad? El artículo: “Endulzando las prácticas agrícolas” expone que la miel tiene un gran potencial como bioproducto en la agricultura. La miel de los meliponinos ya se utiliza como complemento en fertilización foliar, adherente, atrayente y componente de biopelículas a nivel poscosecha y de campo. En este artículo se

comenta cómo la miel puede utilizarse como parte de los bioproductos para el control de plagas y enfermedades de cultivos y frutos.

El texto sucesivo nos habla de cómo la nanotecnología ha permitido producir nanopartículas basadas en lantánidos, las que son utilizadas para desarrollar biosensores, biomarcadores y recientemente como vehículos para transportar y liberar fármacos. Este artículo presenta un resumen de cómo ha evolucionado este proceso, por qué se ha seleccionado a los lantánidos y cuáles son los más recientes avances en el campo biotecnológico en este sentido.

¿Saben cuáles son las ventajas de los biocombustibles sobre los combustibles fósiles? Lean “Bioetanol, biodiésel y biogás: definiciones, obtención y aplicaciones” y descubran el desarrollo de biocombustibles como los derivados de la biomasa. Los biocombustibles pueden ser líquidos (bioetanol y biodiésel) o gaseosos (biometano y biohidrógeno) y se usan para el transporte, la producción de energía eléctrica y como materia prima.

A continuación, descubran un par de trabajos relacionados con la toxicología ambiental. En el primero, “Nanotecnología hasta en las verduras”, se muestra que el alto uso de plaguicidas en México ha causado un exceso de residuos peligrosos en productos agrícolas, por lo que es una necesidad el desarrollo de nuevas estrategias para la detección de estos agroquímicos. Este texto aborda el uso, ventajas y obstáculos de las nanoenzimas como candidatos para la detección rápida y sencilla de plaguicidas peligrosos en México. El segundo trabajo, “Los contaminantes orgánicos persistentes en México”, explica que estos contaminantes son compuestos muy dañinos a los que estamos expuestos sin darnos cuenta. Estas sustancias están asociadas con graves problemas de

salud, como el cáncer, problemas neuronales, de fertilidad y diabetes. Este artículo nos invita a conocer la situación actual en México a este respecto.

¿Qué es el estrés vegetal? ¿Es dañino? Las plantas son la base de la alimentación humana y fuente imprescindible de medicamentos y materias primas. Por esa razón, los científicos buscan desarrollar tecnologías para optimizar su aprovechamiento. La exposición de las plantas a cierto grado de estrés es una técnica agrícola que permite estimular respuestas positivas con un sinnúmero de aplicaciones relevantes. Lean el artículo “El estrés vegetal: principios, aplicaciones y perspectivas” y aprendan más. Otro trabajo relacionado con la botánica, titulado “Más allá de la estética, la función del color en las flores y los frutos”, les responderá las siguientes preguntas: ¿por qué las flores y los frutos tienen colores en gamas de rojos a morados?, ¿por qué esos colores en particular?, ¿pueden los animales guiarse por las tonalidades rojizas, azules y violetas de los frutos y flores en su búsqueda de energía?

Los dos artículos subsecuentes están relacionados con temas muy actuales de biología celular. En el magnífico artículo “El mundo dinámico de las mitocondrias” descubran que estos organelos son responsables de proveer de energía a las células eucariotas y poseen muchas características que sugieren un origen evolutivo independiente y su posterior simbiosis dentro de las células. Las mitocondrias forman redes cuyo contenido cambia dependiendo de las demandas energéticas, poseen su propio material genético y son muy dinámicas, ya que experimentan fisión, fusión y pueden transferirse entre células. En otro texto, “¿De dónde provienen las células troncales pluripotentes? Una mirada a sus fuentes”, exploren las funciones de las células troncales humanas para estudiar el desarrollo embrionario y como terapias de reemplazo celular, que son de suma importancia. En este trabajo se investiga a las células de la placenta humana, ya que, además de tener características de células troncales, poseen propiedades antiinflamatorias, antibacterianas y antivirales.

El escrito titulado “Nemátodos de vida libre: diversos y en todas partes” nos enseña que los nemátodos son gusanos invertebrados con una biología

compleja y fascinante. Existen miles de especies de nemátodos y son los invertebrados más abundantes en suelos acuáticos. Todos los hábitats del planeta tienen nemátodos, desde las fosas abisales hasta los desiertos. Estos organismos contribuyen al funcionamiento de los ecosistemas y al mantenimiento de la vida.

El siguiente par de contribuciones está relacionado con especies animales cercanas al hombre. En la primera, “Destete eficiente, granjas porcícolas rentables”, se explica que los lechones son vulnerables a muchos factores que pueden afectar su desarrollo. El periodo más crítico es su destete, cuando comienzan a consumir alimentos nuevos. Estos alimentos no siempre son los adecuados, lo que puede ocasionar malnutrición y diarreas que pueden ser mortales. El otro texto, “Transmisión de toxoplasmosis entre gatos y humanos”, expone que la toxoplasmosis es una zoonosis producida por *Toxoplasma gondii*, en la que el gato es el huésped definitivo. Sin embargo, el gato excreta la forma infectante del parásito, de modo que resulta de importancia para la salud pública a nivel global, ya que puede producir cuadros clínicos serios en ciertos grupos humanos que tienen estrecho contacto con estas mascotas.

Los dos artículos subsecuentes están relacionados con la terapéutica de enfermedades de alta prevalencia en la población mexicana: la hipertensión y la diabetes. El primero, “La hipertensión: ¿monoterapia o terapia combinada?”, nos explica que la monoterapia ha sido por muchos años el tratamiento de primera línea para la hipertensión arterial. Sin embargo, su eficacia es variable. En los últimos años se ha comprobado que la terapia combinada, usando dosis bajas de diferentes compuestos, es más prometedora para mantener un control de la presión arterial a corto y largo plazo. El segundo texto, “Plantas medicinales mexicanas contra la diabetes”, habla sobre el uso de plantas para tratar enfermedades, en concreto la diabetes mellitus tipo 2. Las plantas han sido la base para el desarrollo de medicamentos y su uso medicinal sigue siendo muy extendido por todo el mundo. México es un país que cuenta con una gran diversidad de plantas, algunas de las cuales podrían emplearse en el tratamiento de la diabetes

en combinación con los tratamientos farmacológicos conocidos y aprobados.

¿Saben qué es la quetzalcoatlita? Es un mineral descubierto en México que tiene propiedades cuánticas. México es un país con una extensa diversidad de minerales. Uno de ellos es la quetzalcoatlita, que tiene una hermosa coloración azul y forma de erizo, y fue nombrado en honor al dios prehispánico Quetzalcóatl. Además de su belleza, poco se sabe de sus propiedades, pero su estructura cristalina y composición química podrían dar origen a características fascinantes, las cuales harían a este mineral un interesante compuesto para aplicaciones tecnológicas.

Los últimos dos textos de la sección de Novedades científicas están relacionados con temas de las ciencias sociales. En el primero, “Esfuerzo cognitivo y democracia” se muestra que, para actuar, necesitamos emplear energía. El artículo revisa resultados recientes que indican que el gasto de energía o “esfuerzo” cognitivo puede resultar aversivo, lo que podría tener repercusiones en el ejercicio de la democracia. El siguiente excelente escrito, “La conspiración del silencio: mentir u ocultar la verdad”, diserta sobre el dilema de mentir, ocultar o decir la verdad en el ámbito familiar cuando algún miembro es diagnosticado con una enfermedad grave en etapa terminal. La relación médico-paciente-familia se puede ver afectada por dificultades en la comunicación que pueden derivar en el fenómeno de la conspiración del silencio.

Nuestro artículo de actualidad está relacionado con un tema ampliamente tratado en nuestra publicación anterior, número 76(2), dedicado a la inteligencia artificial. El texto “Las herramientas del lenguaje y escritura automatizada de la inteligencia artificial perjudican la formación científica” expone que el uso de estas herramientas de la inteligencia artificial tiene un impacto negativo en la formación de estudiantes de posgrado en ciencias. Su uso reduce las habilidades que los alumnos deben poner en práctica, desarrollar y perfeccionar para un exitoso desempeño profesional.

Por último, el artículo de “Innovaciones tecnológicas de la UAM” presenta tres proyectos que se desarrollan en la Universidad Autónoma Metropolitana,



con impacto en la salud y en la agricultura. Los proyectos fueron resultado de la convocatoria emitida por la Rectoría General de la UAM para financiar ideas de investigadores de reciente ingreso. Uno de ellos se refiere al uso de la nanotecnología para fabricar biopolímeros comestibles, seguros para el consumo humano, dentro de los que se puedan encapsular compuestos bioactivos con diversas aplicaciones en la nutrición y la salud. Otro proyecto tiene como objetivo desarrollar trampas eficientes, sustentables y sencillas para controlar la plaga de la mosca que afecta los cultivos de mango en el sur del país. Finalmente, un grupo en donde colaboran investigadores de diversas instituciones trabaja en el desarrollo de bioimplantes que ayudan a la reconexión neuronal después de una lesión en la médula espinal.

Espero que encuentren interesante esta serie de excelentes artículos que provienen de diversas instituciones localizadas en la CDMX y en muchos estados de la República mexicana.

El Comité Editorial de la revista *Ciencia* felicita al doctor Adolfo Guzmán Arenas por el homenaje a su trayectoria que le ofreció la Escuela Superior de Cómputo del Instituto Politécnico Nacional. ¡Muchas felicidades!

ALONSO FERNÁNDEZ-GUASTI

Arturo Fernández Madrigal y Nini Rose Mathews

Hidrógeno verde, el combustible del futuro

La generación eléctrica mundial se basa en el uso indiscriminado de los combustibles de origen fósil, los cuales han causado un gran deterioro ecológico. La alternativa más viable es el uso de las energías renovables para la generación de un combustible limpio, como es el hidrógeno verde.

El problema ambiental y la necesidad de un cambio de combustible

Como es del dominio público, el clima del planeta está cambiando drásticamente. Hay diversas causas, entre las que se encuentran los ciclos naturales del clima en el planeta, el desarrollo de actividades humanas, etc. Estos cambios nos afectan de manera importante, ya que tienen efectos relevantes para la economía del país. Dichos cambios se asocian con la emisión de gases de efecto invernadero, tales como N_2O , CH_4 , SO_2 , CO_2 , CO , etc., los cuales son producto de las diversas actividades humanas. La mayoría de estos gases provienen de la combustión de combustibles fósiles. En particular, alrededor del 40 % del total de las emisiones de estos gases emanan del sector transporte.

La presencia de estos gases en nuestra atmósfera ha traído diversos problemas a nuestro entorno, los cuales van desde el incremento de la temperatura del planeta, deterioro ecológico, clima extremo, daños a la salud, etc., lo que repercute económicamente en nuestra sociedad. En este contexto es importante tomar fuertes medidas para disminuir en gran medida el uso de combustibles fósiles y hacer la transición al uso de otros tipos de combustibles que no emitan este tipo de gases. Uno de los combustibles que posee características adecuadas para utilizarse en los diversos sectores de nuestra economía es el hidrógeno.

El hidrógeno como combustible

El uso del hidrógeno es indispensable para la industria petroquímica, donde se utiliza para la refinación del petróleo; en la agroindustria para la fabricación de fertilizantes; en la elaboración de productos químicos, como el peróxido de hidrógeno (agua oxigenada), y en la industria de semiconductores, entre otros. De acuerdo con sus propiedades físicas y químicas, el hidrógeno tiene el mayor poder calorífico,



Vector energético
El vector energético es aquel compuesto, dispositivo o sustancia que almacena energía. Ésta puede utilizarse de formas diversas.

comparado con cualquier otro combustible de origen fósil, lo cual implica que nos proporciona mayor contenido de energía por kilogramo de hidrógeno; así, por ejemplo, un kilogramo de hidrógeno genera la misma cantidad de energía que 2.8 kg de gasolina, que 2.54 kg de gas natural y la misma cantidad de energía que 2.6 kg de gas licuado propano. En comparación con el gas natural, el hidrógeno posee entre 33.33 y 39.41 kWh/kg, mientras que aquél posee menos de la mitad; es decir, entre 13.90 y 15.42 kWh/kg. Aunado a lo anterior, durante su combustión no emite ningún gas de efecto invernadero.

Debido a su alto poder energético, una posible explosión de este gas puede resultar más violenta por su alto contenido energético. Sin embargo, debido a que el hidrógeno posee un coeficiente de difusión más alto, comparado con cualquier gas o compuesto, bastará asegurarse de ventilar adecuadamente el posible lugar de fuga de este gas para reducir el riesgo de explosión. La temperatura de autoignición de una mezcla de hidrógeno/aire es de alrededor de 558 °C, mientras que para la mayoría de los combustibles fósiles esta temperatura oscila entre 200 y 500 °C. Esto indica que la mezcla hidrógeno/aire se inflamará a mayor temperatura, representando con ello una ventaja desde el punto de vista de la seguridad. Sin embargo, su energía de ignición es baja (0.017 milijoules), lo cual indica que dicha mezcla es propensa a inflamarse, y serán suficientes descar-

gas eléctricas estáticas para que esto ocurra. Al igual que los combustibles fósiles, el hidrógeno es un **vector energético**; es decir, es necesario obtenerlo a partir de diversas fuentes. Mientras que las gasolinas son producto del procesamiento del petróleo utilizando diversos procesos de refinación, en el caso del hidrógeno su obtención es posible a partir del petróleo y el agua.

Aunque tradicionalmente el hidrógeno se almacena en forma de gas, la formación de hidruros metálicos o la adsorción de dicho gas en sistemas como los nanotubos de carbón, los compuestos fulerenos, las microesferas de vidrio o en la formación de alanatos, han resultado ser la forma más segura para su almacenamiento y transportación. En particular, los hidruros metálicos actualmente tienen un costo aproximado de \$8 USD/kilogramo (**Figura 1**).

■ ■ ■ **El hidrógeno verde**

■ Al igual que las gasolinas, el hidrógeno no se encuentra disponible en la naturaleza, se obtiene a partir del petróleo o el agua. Actualmente, se han establecido denominaciones basadas en colores para clasificar el hidrógeno, con el fin de distinguir su origen (National Grid, 2022). Así, por ejemplo, el *hidrógeno café* y el *negro* se obtienen a partir de derivados del petróleo. Esto quiere decir que empleando el gas natural, el carbón u otros derivados de origen fósil,

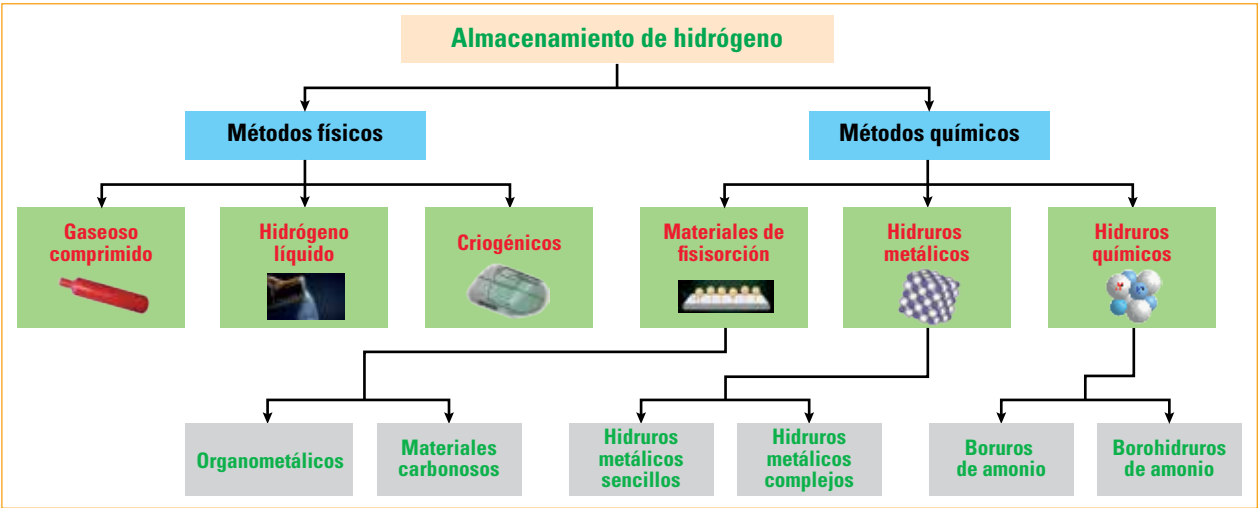


Figura 1. Métodos de almacenamiento del hidrógeno.

y realizando un tratamiento termoquímico, mediante el proceso denominado gasificación, podrá obtenerse hidrógeno negro o café. De igual manera, el *hidrógeno gris* se obtiene a partir de productos derivados del petróleo; en particular, utilizando el metano, al cual se le hace un tratamiento termoquímico con cualquiera de los siguientes procesos: reformación catalítica, autorreformato u oxidación parcial. El *hidrógeno azul* se obtiene mediante oxidación parcial: se le somete al proceso denominado secuestro de carbón (atrapamiento del CO₂ mediante diversos métodos).

Por otro lado, la denominación de *hidrógeno verde* corresponde al hidrógeno que se obtiene a partir del agua, empleando el proceso denominado electrólisis (Wood Mackenzie, 2019). La electrólisis requiere electricidad, la cual deberá obtenerse a partir

de energías renovables. También es posible obtener hidrógeno verde a partir de fotólisis o fotoelectrólisis del agua, proceso similar a la electrólisis, en el que, en lugar de aplicar una corriente eléctrica para “romper” la molécula de agua, se hace uso de materiales fotosensibles que inyectan electrones al agua, empleando la absorción de la radiación solar. Existe otro proceso denominado termólisis, el cual consiste en la descomposición directa del agua en sus componentes (hidrógeno y oxígeno), los cuales se obtienen al someter al agua a temperaturas superiores a los 2500°C. A estas elevadas temperaturas, prácticamente el 20 % del agua se descompone en hidrógeno y oxígeno, por lo que para lograrlo será necesario utilizar concentradores solares con los cuales se pueden obtener dichas temperaturas. La **Figura 2** muestra

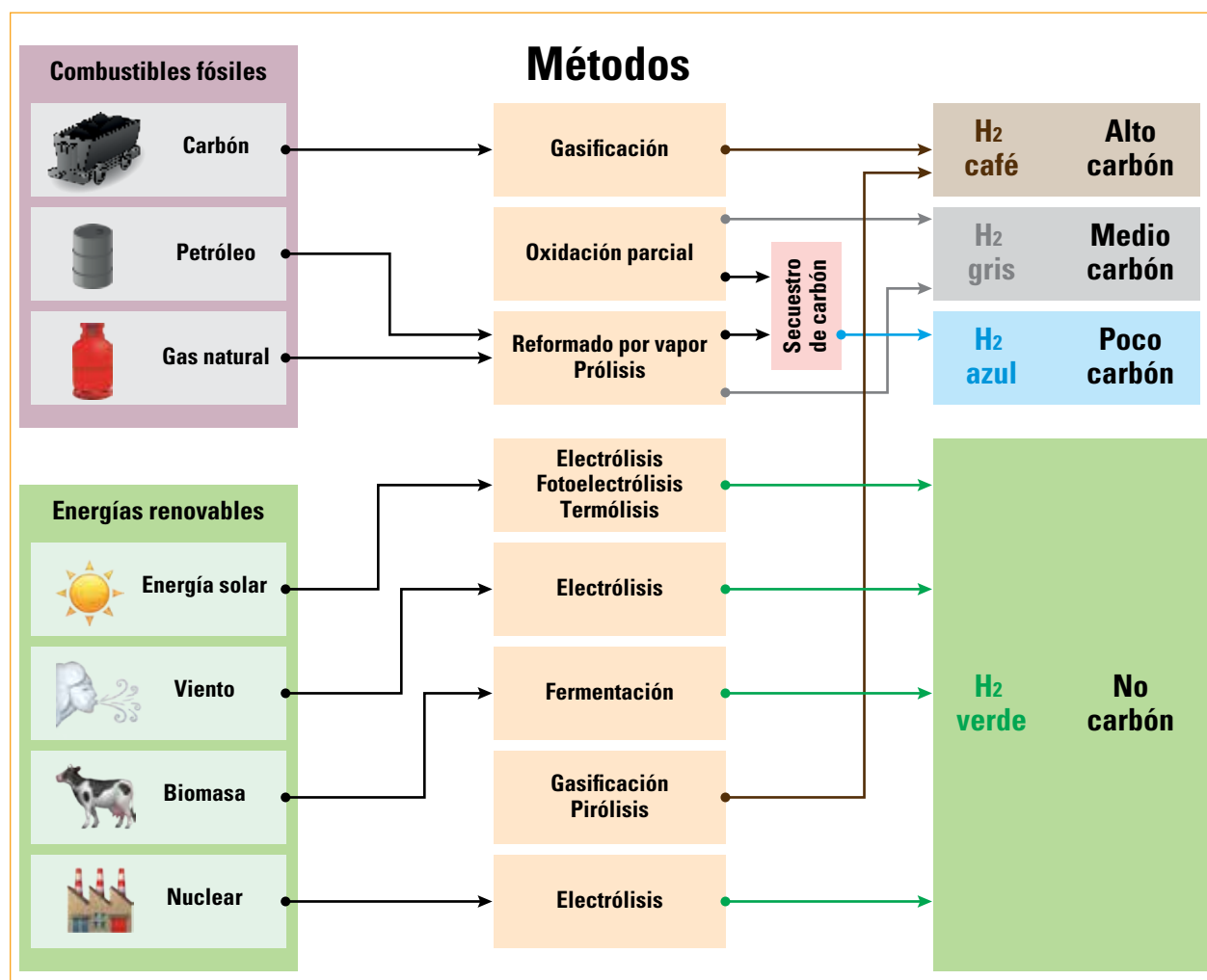


Figura 2. Clasificación por colores de los diversos métodos de preparación del hidrógeno.

con mayor detalle los procesos de conversión y los diversos métodos que se emplean para obtener las diversas denominaciones de hidrógeno.

La economía del hidrógeno

 Con los Acuerdos de París (United Nations, 2015), algunos países propusieron iniciar la descarbonización de sus economías para detener el incremento de la temperatura del planeta y así reducir los efectos del cambio climático. Para lograrlo, en el año 2050 se tiene que reducir la emisión de gases de invernadero en alrededor del 85 %; aunque esta propuesta se contrapone a la necesidad de satisfacer la creciente demanda energética (la cual se estima que para 2050 será del 150 %). En la actualidad se utilizan los combustibles de origen fósil; sin embargo, los recursos petrolíferos se están agotando, por lo que es necesario migrar a una economía basada en un recurso energético sostenible y que no posea altos niveles de contaminación. Las tecnologías del hidrógeno ofrecen esta alternativa energética para continuar con el desarrollo económico mundial sin comprometer aspectos ambientales. Dichas tecnologías, de la mano de fuentes renovables de energía, permitirán generar la energía eléctrica necesaria para el desarrollo económico. Asimismo, el uso de este gas ayudará a minimizar los **problemas de intermitencia** que presentan las energías renovables.

Diversos países del mundo ya iniciaron acciones enfocadas al desarrollo de un sistema económico basado en el uso del hidrógeno. En particular, Islandia ha realizado los cambios necesarios para que, a partir de 2050, su economía se base en su uso. En diversos países de la Unión Europea se han establecido programas, tales como rutas tecnológicas, libros blancos y se han implementado leyes para el fomento del hidrógeno como combustible. Algunos países del continente asiático desarrollan programas para la utilización del hidrógeno en sectores de la economía, como el transporte. La gran mayoría de las compañías automotrices han desarrollado e implementado automóviles que funcionan con hidrógeno, utilizando celdas de combustible; en el sector industrial se emplea el hidrógeno para operar centrales

termoeléctricas, y en el sector residencial se utiliza el hidrógeno para proveer energía eléctrica a las casas o departamentos. Existen proyectos demostrativos en los cuales se ha validado la operatividad de este gas como combustible en transportes marítimos, ferrocarriles, submarinos, aviones, etc., utilizando celdas de combustible o la adaptación de motores de combustión interna para que funcionen con hidrógeno. Actualmente, el costo de conversión de un motor de combustión interna para utilizar hidrógeno ronda entre los 4 000 y los 6 000 pesos. Por otro lado, el costo de un automóvil con celdas de combustible oscila entre el millón y medio y los dos millones de pesos.

La visión de una economía basada en el hidrógeno significa el empleo de fuentes renovables de energía para producir hidrógeno verde, lo cual incidiría en el uso de recursos domésticos, reduciendo los costos de elaboración y permitiendo el cuidado del medio ambiente. En la medida en que se alcancen estas expectativas, una economía del hidrógeno beneficiaría al mundo proporcionando una mayor seguridad energética y calidad medioambiental.

Existen diversos retos en la construcción de la economía del hidrógeno, algunos de los cuales son de tipo tecnológico, como el desarrollo de materiales catalíticos de bajo costo, el desarrollo de sistemas eficientes de almacenamiento del hidrógeno, etc., así como la implementación de cadenas de valor para sistemas basados en el uso del hidrógeno como combustible. En relación con los retos sociales, deberán desarrollarse programas que favorezcan la apropiación social de las tecnologías del hidrógeno en los diversos estratos sociales.

Cambios legislativos para nuevos combustibles

 Una economía basada en el uso del hidrógeno como combustible requiere de la implementación de leyes y políticas públicas que fomenten y regulen el uso de este combustible. Actualmente, existen diversos organismos internacionales que promueven diferentes lineamientos para la implementación de normas y códigos en la producción, almacenamiento, uso, manejo y distribución de este gas. En cada país

Problemas de intermitencia

En las energías renovables, son producto de los cambios que sufre, por ejemplo, la intensidad en la radiación solar a lo largo del día y la noche.



se deberán instaurar estos lineamientos para que los organismos legislativos nacionales creen órganos dedicados a su desarrollo y control. En México, dichos lineamientos se discuten y aprueban en los Comités Consultivos Nacionales de Normalización (CCNN) y los Comités Técnicos de Normalización Nacional (CTNN), organismos conformados por diversos sectores representativos de la sociedad. En ellos se norman las actividades, instrumentos y procedimientos que se realizarán para las diversas aplicaciones en las que interviene el hidrógeno como combustible. Estos comités están regulados por la Secretaría de Economía (en el caso de México), que se encarga de darle validez oficial a las actividades y documentos que resulten de las reuniones que se realicen.

En diversos países del mundo, se tienen ejemplos de lineamientos que –a partir de propuestas de proyectos de implementación del uso de hidrógeno como combustible para diversos sectores de la sociedad– han culminado en normas y leyes tanto a nivel estatal como nacional, y en donde el poder legislativo ha participado activamente. Un ejemplo de ello

es Argentina, donde en 2004 la Cámara de Diputados aprobó el uso del hidrógeno como combustible, con el propósito de dar viabilidad a proyectos de generación de hidrógeno mediante turbinas eólicas en la Patagonia. Otro caso es la iniciativa de un grupo denominado Hydrogen Fuel Cell Partnership, en California, EUA, que propuso a inicios del año 2000 que a partir de 2025 circulen en el estado automóviles con cero emisiones de dióxido de carbono, por lo que la oficina gubernamental recomendó su implementación a nivel estatal. Recientemente, el gobierno de Nueva Zelanda ha preparado un programa estratégico para el uso del hidrógeno verde, en tanto que Japón ha llevado a cabo un programa de 80 estaciones de llenado de hidrógeno; asimismo, junto con 21 países, coordina algunos proyectos de implementación del hidrógeno verde. Corea del Sur, por su parte, ha desarrollado un plan de trabajo para tener autobuses operados con hidrógeno en los siguientes 20 años, mientras que en Francia se tiene programado destinar 100 millones de euros para realizar diversos proyectos con hidrógeno y concluirlos

en los próximos cinco años. En 2018, en Bélgica, se aprobó una ley para el fomento de proyectos del uso del hidrógeno que se llevarán a cabo en los próximos 25 años. En la gran mayoría de las propuestas se ha tenido que solicitar el apoyo del gobierno y el poder legislativo para poder realizar estos proyectos.

Perspectivas a futuro para el empleo del hidrógeno como combustible

Es frecuente escuchar en los medios de comunicación que el sistema energético, tanto mexicano como mundial, seguirá basado en el uso del petróleo, por lo menos hasta el año 2050. Es decir, que todavía dependeremos del petróleo los próximos 30 años. Sin embargo, muchos sectores de la sociedad han reaccionado emprendiendo acciones dirigidas al desarrollo y construcción de una economía basada en el hidrógeno, para lo cual serán necesarias la elaboración y puesta en marcha de un plan nacional y cronograma tecnológico del uso del hidrógeno como combustible en los diversos sectores produc-

tivos de la economía. Cada país establecerá las directrices que se deban seguir con el fin de realizar el cambio hacia una economía basada en el hidrógeno. En este plan a futuro se deberá indicar en qué sectores de la sociedad podrá tener mayor impacto la sustitución del combustible; por ejemplo, en el sector transporte, residencial e industrial, entre otros. Del mismo modo, se establecerán los lineamientos jurídicos y legislativos para implementar estos cambios en los diversos sectores de la sociedad. Junto a todas estas propuestas, se deberán establecer programas de apropiación social de la tecnológica, con el objetivo de que la población integre estos cambios en sus actividades y se reduzca el posible rechazo social al cambio tecnológico.

Conclusiones

Como producto de la actividad humana, se ha incrementado de manera descontrolada la emisión de diversos gases que producen el cambio climático. Dichos gases son producto de la utilización de com-



bustibles provenientes del petróleo. Gases como el monóxido de carbono, el dióxido de carbono, óxidos nitrosos, etc., modifican el clima, además de tener un efecto nocivo en los seres vivos. Por tal motivo, es necesario sustituir el tipo de combustible que se usa con uno que no produzca gases contaminantes del ambiente. Por sus características fisicoquímicas, el hidrógeno es un combustible adecuado para este propósito. Y si bien este gas es muy abundante, es necesario extraerlo de fuentes como el petróleo y el agua. Dependiendo de su fuente de extracción, recibe diversos nombres, como hidrógeno gris, café, azul, verde, etc. Desde el punto de vista de la sustentabilidad, el hidrógeno verde es el más adecuado, ya que para su elaboración se deben utilizar fuentes renovables de energía, empleando la electricidad que de ellas se genera para separar la molécula de hidrógeno presente en el agua.

El empleo del hidrógeno como combustible ha despertado enorme interés en México y en el mundo, interés que ha hecho que diversos países inviertan recursos económicos para producirlo, almacenarlo y aplicarlo en una variedad de sectores, como el industrial, residencial y de transporte. Esto ha traído como consecuencia que se esté desarrollando la denominada economía del hidrógeno; es decir, la búsqueda de un desarrollo económico, industrial y del trans-

porte, utilizando hidrógeno como combustible. Para ello será preciso superar los retos que plantea dicha economía, uno de los cuales es que deberán implementarse leyes y políticas públicas que permitan su crecimiento.

Es de suma importancia la continuación y aceleramiento del desarrollo de esta nueva economía, ya que de esa manera podremos garantizar la descarbonización de nuestra economía y disminuir los efectos del actual cambio climático.

Los autores agradecen a A. Elizabeth James por el amable apoyo en la realización de las figuras, y al físico Juan Tonda por la revisión del texto.

Arturo Fernández Madrigal

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

afm@ier.unam.mx

Nini Rose Mathews

Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México.

nrm@ier.unam.mx

Lecturas recomendadas

National Grid (2022), “The hydrogen color spectrum”, *National Grid*, sección Energy Explained [en línea]. Disponible en: <https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/hydrogen-colour-spectrum>, consultado el 26 de febrero de 2025.

Rinkenbach, J. P. (2022), “Hidrógeno: ¿espejismo o realidad?”, *Energía a Debate* [en línea]. Disponible en: <https://energiaadebate.com/hidrogeno-espejismo-o-realidad>, consultado el 26 de febrero de 2025.

United Nations (2015), “El acuerdo de París”, *United Nations/Climate Change* [en línea]. Disponible en: unfccc.int, consultado el 26 de febrero de 2025.

Wood Mackenzie (2019), “Energy transition. The future for green hydrogen”, *Wood Mackenzie* [en línea]. Disponible en: <https://www.woodmac.com/news/editorial/the-future-for-green-hydrogen/>, consultado el 26 de febrero de 2025.

Nicolás Enrique Vázquez-Barragán, Karen Rodríguez-Rosales y Francisco Javier de Moure-Flores

Ventanas fotovoltaicas: el futuro de la energía solar

La energía solar se ha convertido en una alternativa muy atractiva para producir electricidad mediante el uso de celdas solares. En este artículo se describen los materiales que constituyen a un dispositivo solar y cómo el efecto fotovoltaico influye en la generación de corriente eléctrica. Además, se menciona la futura aplicación que tendrá la tecnología fotovoltaica sobre ventanas ordinarias.

Introducción

En la actualidad, la búsqueda por mejorar la calidad de vida ha llevado a crear una sociedad más industrializada, con una gran necesidad tecnológica y, como consecuencia, un aumento sin precedentes en el consumo energético en todo el mundo. Pero, ¿de dónde proviene la energía que se utiliza? Principalmente de fuentes no renovables, como el gas natural, el carbón y el petróleo, las cuales no pueden reaprovecharse una vez utilizadas. Se estima que para el año 2050 estos combustibles fósiles no serán suficientes para satisfacer los requerimientos energéticos del mundo si continúan siendo la base para la producción de energía. Su excesivo y acelerado uso no sólo podría provocar una crisis energética, sino también agravar el calentamiento global. Por lo tanto, es necesario proponer un uso cada vez más extenso de energías alternativas.

Estas fuentes de energía pueden aprovecharse ilimitadamente con la tecnología adecuada, sin riesgo de agotamiento. Dentro de este tipo de energías se encuentran la energía eólica, la solar, la biomasa, la mareomotriz, la geotérmica y la energía del hidrógeno, entre otras. La solar se ha considerado una de las más importantes debido a la gran cantidad de energía que nuestra estrella irradia diariamente sobre la Tierra, 10 000 veces mayor que la que se consume diariamente en todo el planeta, lo cual da una idea del gran potencial que tiene la energía solar para satisfacer las demandas energéticas de la sociedad humana (Arancibia Bulnes y Best y Brown, 2010).

El uso de la energía solar ofrece varias ventajas:

1. Es tan abundante que se considera inagotable.
2. Permite generar electricidad mediante el uso de celdas solares.



3. Sirve para calentar agua y climatizar espacios mediante sistemas térmicos.
4. Hace posible racionalizar el consumo de los combustibles fósiles.

Una de las mejores maneras de aprovechar la energía del sol es mediante el uso de celdas solares, las cuales transforman directamente la luz en electricidad a través del efecto fotovoltaico. Este fenómeno se basa en el uso de materiales semiconductores que, al ser irradiados con luz solar, no sólo generan electricidad, sino también actúan en la degradación de contaminantes y en **procesos termoeléctricos**.

De acuerdo con las últimas cifras de la Agencia Internacional de Energía, en 2023 la generación global de electricidad mediante energía solar fotovoltaica alcanzó los 485 TWh, impulsada por la reducción de costos y el aumento en la eficiencia de las celdas solares. En México, la producción fue de 18 TWh, provenientes principalmente de los parques fotovoltaicos de Puerto Peñasco, Santa María y Oregana en Sonora, Aura Solar en Baja California, Don Alejo en el Estado de México y Cuyoaco en Puebla.

Efecto fotovoltaico

Para entender mejor este efecto, es necesario desglosar la palabra *fotovoltaico*. Este término está formado por *foto*, que proviene de la palabra *fotón* (luz), y *voltaje*, que proviene de la palabra *voltaje* (unidad de energía eléctrica). Entonces, se puede entender como el efecto de producir energía eléctrica mediante la luz. Sin embargo, el concepto de fotón tiene una base científica más profunda que nos remonta a inicios del siglo xx. En el año 1900, el científico alemán Max Planck propuso que la luz se emitía en paquetes de energía llamados “cuantos”, lo que sugería que la luz podría tener características de partículas diminutas (véase la **Figura 1**). Aunque en ese momento esto era sólo una teoría y aún no se había comprobado la existencia de estas partículas, en 1905 Albert Einstein demostró que la teoría de Planck era correcta, comprobándola mediante un experimento conocido como el efecto fotoeléctrico (Cervantes-Cota y Rodríguez-Meza, 2006). De este

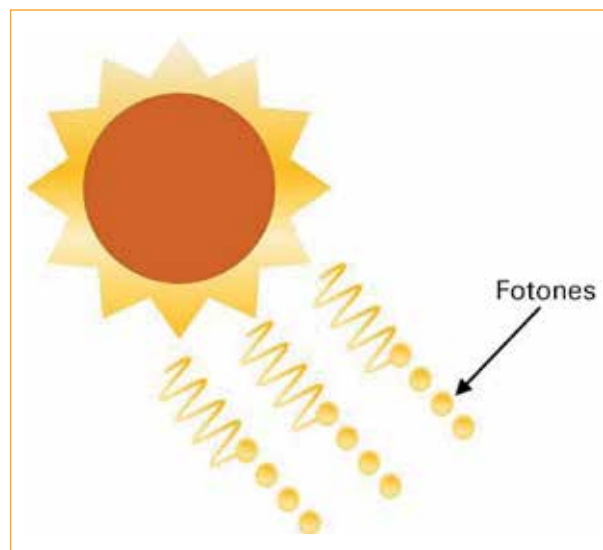


Figura 1. Presencia de fotones en la luz solar (dualidad onda-partícula). Elaborado por los autores.

modo, se consideró que la luz no sólo podía comportarse como una onda, sino también como un conjunto de partículas, conocidas como fotones, lo que constituyó el concepto de la **dualidad onda-partícula** de la luz.

Materiales semiconductores

Los semiconductores pueden clasificarse como un material intermedio entre los conductores y los aislantes, ya que su conductividad eléctrica aumenta ante estímulos energéticos como luz, calor o electricidad, lo que les permite comportarse como conductores. La característica que define a los semiconductores utilizados en celdas solares es su alta capacidad para reaccionar a los fotones incidentes para producir electricidad. En la actualidad, la mayoría de las celdas solares son fabricadas con silicio, el semiconductor más popular a la fecha.

Los materiales semiconductores se clasifican en semiconductores tipo *n* y semiconductores tipo *p*, cuya unión constituye la estructura básica de una celda solar llamada unión *n-p*. Los semiconductores tipo *n* se caracterizan por poseer un excedente de electrones dentro de sí, y los tipo *p*, por tener una mayor cantidad de huecos; un hueco se puede considerar una “partícula” con carga positiva, la cual es

Proceso termoeléctrico

Aquel en que hay una conversión de calor en electricidad mediante materiales semiconductores.

Dualidad onda-partícula

Propiedad de la luz que le permite comportarse como onda o como partícula.

generada por la ausencia de un electrón. El silicio puede ser un semiconductor tipo *n* o tipo *p*. La capacidad del silicio de adquirir un exceso de electrones o de huecos depende de que se agregue otro elemento a su estructura, al cual se le conoce como impureza. Por ejemplo, al agregar antimonio al silicio, se convertirá en un tipo *n*; mientras que si se le agrega otro elemento, como el galio, se volverá un tipo *p*. Supongamos que tenemos un millón de granitos de sal equivalentes a átomos de silicio y después agregamos cinco granos de azúcar equivalentes a átomos de antimonio. Se debe saber que un átomo de silicio sólo puede compartir cuatro de sus electrones (electrones de valencia), mientras que el antimonio, cinco. En ese sentido, al unir un granito de sal (silicio) con un granito de azúcar (antimonio), cuatro electrones provenientes del silicio se unirán a cuatro del antimonio, y sobra un electrón. Pero al tener cinco granitos de azúcar, se contará con un excedente de cinco electrones. De esta manera, el silicio se vuelve un semiconductor tipo *n* (véase la **Figura 2**).

Supongamos ahora que los cinco granitos de azúcar son equivalentes a átomos de galio y que éstos sólo pueden compartir tres de sus electrones (electrones de valencia). Entonces, al unir un granito de sal (silicio) con un granito de azúcar (galio), tres de los cuatro electrones del silicio se unirán con tres del galio, por lo que un electrón quedará sin enlazarse a otro. A esta ausencia de un electrón para enlazarse con el sobrante proveniente del silicio se le conoce como *hueco*. Pero al tener cinco granitos de azúcar, se contará con un excedente de cinco huecos. De este modo, el silicio se vuelve un semiconductor tipo *p* (véase la **Figura 2**).

Celdas solares

También llamadas celdas fotovoltaicas, debido al principio físico que las rige, son dispositivos bastante simples. Como ya se mencionó, están formadas por la unión de un semiconductor tipo *n* y uno tipo *p*, además de un contacto frontal y uno posterior, como se muestra en la **Figura 3**. El proceso para la generación eléctrica se describe a continuación. Los fotones provenientes del sol son absorbidos en su

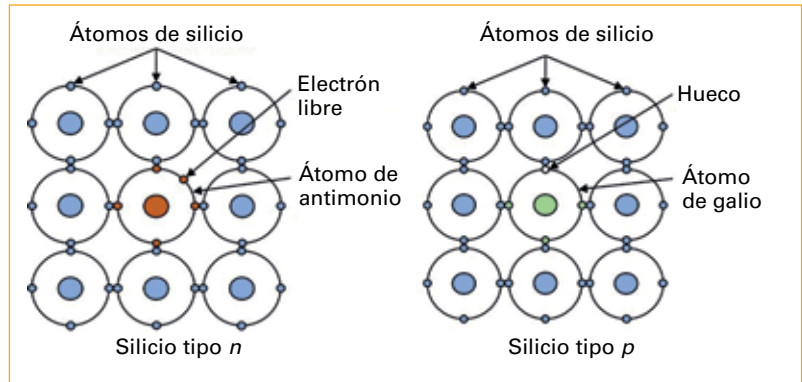


Figura 2. Semiconductor de silicio tipo *n* (izquierda) y tipo *p* (derecha). Elaborado por los autores.

mayoría por el semiconductor tipo *p*, cuyo material es donde se lleva a cabo el efecto fotovoltaico. Un fotón al ser absorbido excita a un electrón, lo cual significa que el electrón adquiere suficiente energía para abandonar su sitio y ocupar un lugar vacío en otro átomo –lo que antes se definió como hueco–. Al haber tantos electrones que están siendo excitados energéticamente por los fotones, gran parte de ellos pasarán por el mismo proceso de ocupar un nuevo sitio, desplazándose hacia el semiconductor tipo *n* y llegando finalmente al contacto frontal de la celda (terminal positiva), mientras que los huecos se irán moviendo hasta llegar al contacto posterior (terminal negativa) (véase la **Figura 3**). Este movimiento de los electrones dentro de la celda solar produce un potencial eléctrico comúnmente conocido como

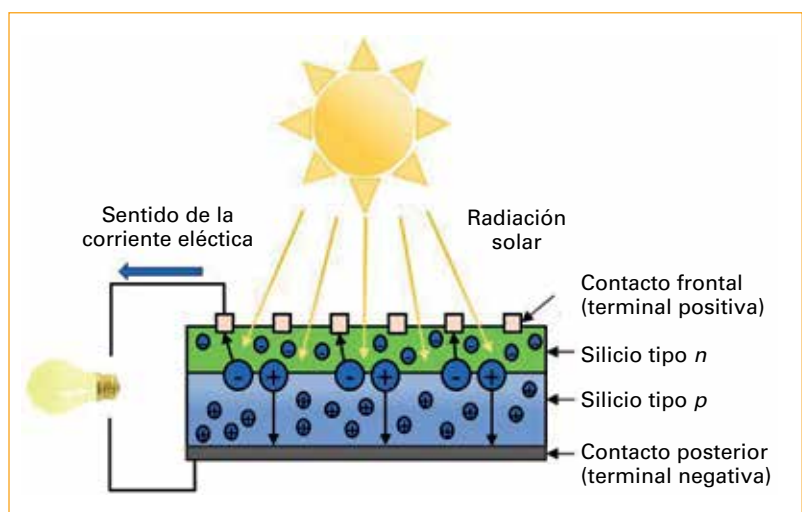


Figura 3. Esquema de una celda solar basada en silicio. Elaborado por los autores.

voltaje, pero al ser tantos electrones desplazándose de forma continua, se generará una corriente eléctrica, a lo que típicamente llamamos electricidad.

Actualmente, alrededor del 90 % de las celdas solares que se usan en el mundo emplean el silicio tipo *n* y tipo *p* como materiales fuente para generar electricidad, debido a que posee ciertas ventajas que lo hacen ideal, como su gran abundancia en el planeta, su nula toxicidad y su buena tasa de conversión de luz solar en electricidad, cuyo valor actualmente se encuentra en 26 %. Sin embargo, en las últimas décadas han surgido diferentes materiales en la búsqueda de mejorar la eficiencia de las celdas basadas en silicio, puesto que éstas se caracterizan por tener un alto costo de producción, dificultades para su almacenamiento —el cual es su principal inconveniente— y un bajo **coeficiente de absorción** (capacidad para absorber luz solar), lo cual requiere de un gran espesor (200 μm) para que puedan absorber la mayor parte de la luz incidente; es decir, se necesita una gran cantidad de silicio en las celdas para tener una buena eficiencia de conversión.

Una buena alternativa a las celdas convencionales de silicio son las celdas solares de película delgada, debido a su simplicidad en cuanto a diseño, bajo costo de producción, menor cantidad de material y a su alta eficiencia de conversión, lo que las hace competitivas contra la tecnología tradicional de silicio. La celda basada en la estructura CdS/CdTe es una de las más importantes, pues tiene una eficiencia actual del 22.1 %. La gran diferencia entre las celdas basadas en silicio y las de película delgada radica en

los espesores utilizados, ya que para la tecnología de CdS/CdTe, valores inferiores a los 100 nm para el CdS y menores a los 5 μm para el semiconductor CdTe son suficientes para convertir la energía del sol en electricidad, haciéndolos dispositivos mucho más económicos, debido a que se requiere una cantidad mínima de material.

Estas celdas solares se construyen en una estructura conocida, dentro del campo fotovoltaico, como **superestrato**, que consiste en la disposición: vidrio/tco/CdS/CdTe/metal, como se muestra en la **Figura 4**. Primeramente, el material **TCO** (**transparent conductive oxide**) se deposita sobre vidrio común. Los tco son óxidos semiconductores de alta conductividad eléctrica, cuya función es ser el contacto frontal (positivo) de la celda. Posteriormente, se realiza el crecimiento de la capa CdS tipo *n*, material que es deseable mantener lo más delgado posible.

A la estructura formada por el vidrio, tco y CdS (vidrio/tco/CdS) se le conoce como capa ventana, llamada así por la elevada transparencia que presentan estos materiales, lo cual permite que una alta fracción de la luz solar pueda llegar hasta el compuesto semiconductor CdTe tipo *p*, material que se deposita sobre el CdS. Esta capa se caracteriza por ser la más gruesa dentro de la celda solar y por tener un alto coeficiente de absorción; ambas propiedades favorecen que pueda absorber una gran cantidad de fotones para así promover el efecto fotovoltaico. Por último, se deposita una capa muy delgada del contacto posterior (negativo), comúnmente constituido por cobre y oro, dado que estos metales mejoran la conductividad eléctrica de la celda solar.

Superestrato
Configuración de una celda solar en la que la luz entra a través del vidrio.

TCO (**transparent conductive oxide**)
Material semiconductor que conduce electricidad y deja pasar la luz.

Coeficiente de absorción
Medida de qué tan bien puede un material absorber la luz.

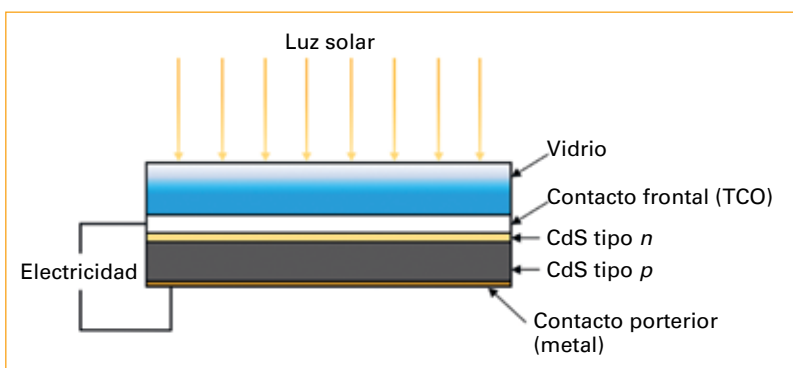


Figura 4. Estructura básica de una celda solar basada en los semiconductores CdS/CdTe. Elaborado por los autores.

Ventanas fotovoltaicas

En los últimos años, el rumbo de la investigación para las celdas solares de película delgada basadas en CdS/CdTe se ha dirigido a crear dispositivos fotovoltaicos con un adelgazamiento prominente de la capa del semiconductor CdTe tipo *p*. Si bien el diseño de un dispositivo solar que involucre una capa de CdTe de aproximadamente 2 μm permite semitransparencia, sin perder propiedades fundamentales que afecten la conversión de energía solar a eléctrica, no

es suficiente para ser considerado visiblemente semitransparente. Para ello, se requiere de una contundente reducción de la capa absorbente, lo cual representa grandes desafíos para el CdTe debido a que puede afectar en gran medida la captación de luz solar y, por ende, redundar en una baja eficiencia de conversión. Un régimen de espesores sumamente delgados es un gran desafío para la fabricación de celdas solares CdS/CdTe con elevada eficiencia y semitransparencia.

No obstante, la semitransparencia es una característica muy atractiva para las celdas fotovoltaicas basadas en CdS/CdTe debido a que estos dispositivos de película delgada, en un futuro cercano, podrán incorporarse como ventanas fotovoltaicas en edificios y viviendas o integrarse como techos panorámicos en automóviles, en los cuales se aprovecharía la luz del día para producir electricidad y, por otro lado, aportarían un valor estético, particularmente como un entintado.

Conclusiones

Las celdas solares fotovoltaicas son consideradas una alternativa viable que con el tiempo sin duda competirán con el carbón, el gas natural y el petróleo para producir electricidad. La investigación científica de los últimos años ha hecho grandes avances en los materiales semiconductores para uso

en celdas solares, lográndose eficiencias récord, así como la reducción de los costos para su producción e implementación a gran escala. La reducción en el espesor del semiconductor CdTe permitiría la obtención de celdas solares semitransparentes (ventanas fotovoltaicas), las cuales son un campo poco explorado hasta el momento.

Agradecemos a la Universidad Autónoma de Querétaro por medio del fondo Química Somos Todos 2021, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca otorgada al estudiante de posgrado Nicolás Enrique Vázquez Barragán para la redacción de este artículo.

Nicolás Enrique Vázquez-Barragán

Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
nevb92@gmail.com

Karen Rodríguez-Rosales

Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
karen.uaq@outlook.com

Francisco Javier de Moure-Flores

Facultad de Química, Materiales-Energía, Universidad Autónoma de Querétaro.
fcomoure@hotmail.com

Referencias específicas

Arancibia Bulnes, C. y R. Best y Brown (2010), "Energía del sol", *Ciencia*, 61(2):10-17.
Cervantes-Cota, J. L. y M. A. Rodríguez-Meza (2006), "El efecto fotoeléctrico", *Revista Científica Multidisciplinaria de Prospectiva*, 13(3):303-311.

National Renewable Energy Laboratory (NREL), "Photovoltaic Research" [en línea]. Disponible en: <<https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>>, consultado el 23 de abril de 2025.

Luis Angel Cabanillas Bojórquez, Marilyn Shomara Criollo Mendoza y José Basilio Heredia

Potencial anticancerígeno en los desechos de camarón

Los desechos de camarón son fuente de compuestos biológicamente activos que han sido ampliamente estudiados en distintos modelos de cáncer. Estos compuestos han demostrado su potencial para prevenir y disminuir el desarrollo de esta enfermedad. Actualmente, se están desarrollando estrategias para el aprovechamiento de los desechos con el fin de utilizarlos en tratamientos contra el cáncer.

Importancia de los desechos de camarón

En un artículo publicado en esta revista sobre los desechos de camarón se habla de las oportunidades para la industria de los productos derivados del procesamiento de este crustáceo.¹ Estos desechos comprenden la parte no comestible, por ejemplo: cabeza, cola y exoesqueleto (**Figura 1**). De acuerdo con el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP), la producción de camarón ha ido en aumento en los últimos años. Para el año 2021 se reportó una producción de camarón de 261 958 toneladas en México, de las cuales se generaron alrededor de 150 000 toneladas de desechos (Mathew y cols., 2020; SIAP, 2022). En la composición de los desechos de camarón resalta su contenido de proteínas, carbohidratos, lípidos, compuestos aromáticos y su contenido de pigmentos. En este sentido, se ha comprobado en algunos modelos *in vitro* e *in vivo* que estos compuestos poseen funciones biológicas como antioxidantes, antimicrobianos, antiinflamatorios y anticancerígenos (Mathew y cols., 2020).

Por otro lado, compuestos encontrados en los desechos de camarón (**Figura 2**), como los ácidos grasos omega-3 (EPA y DHA), la astaxantina y el quitosano (obtenido de la desacetilación de quitina), han sido ampliamente estudiados debido a su potencial en la prevención e inhibición de distintos tipos de cáncer (Faraone y cols., 2020; Liang y cols., 2022; Wei y cols., 2022). Por lo anterior, en esta nueva entrega se da a conocer de manera particular el potencial anticancerígeno de los compuestos presentes mayoritariamente en los desechos de camarón.

¹ Luis Angel Cabanillas Bojórquez, Erick Paul Gutiérrez Grijalva y José Basilio Heredia, "Desechos de camarón: un coctel de oportunidades para la industria", vol. 71, núm. 4, octubre-diciembre de 2020.



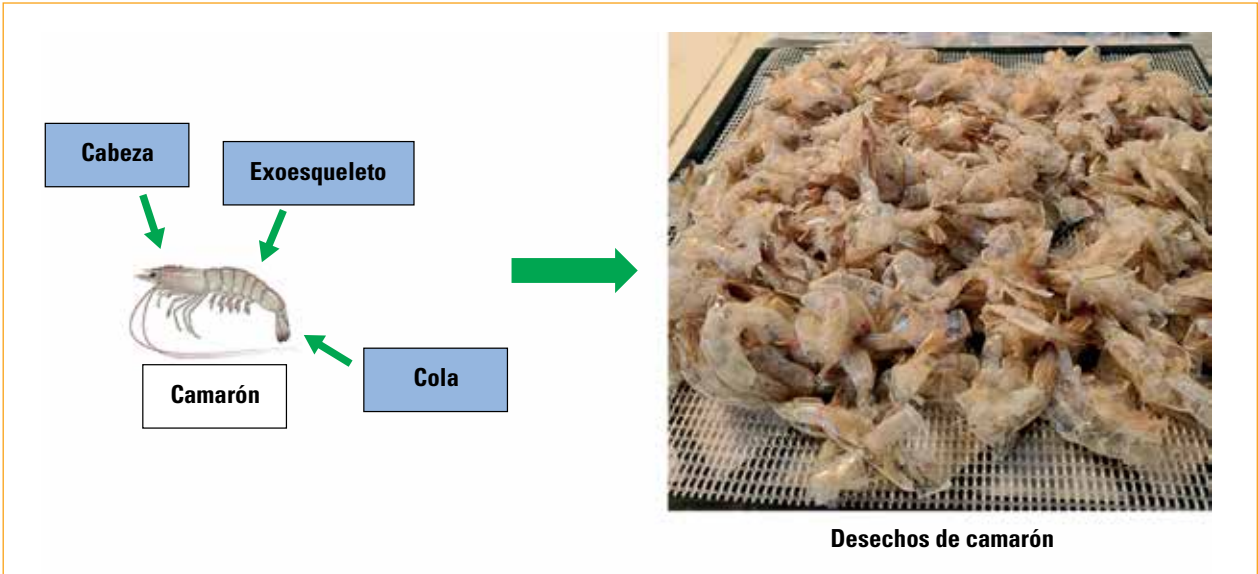


Figura 1. Composición de los desechos de camarón.

■ **Compuestos bioactivos de los desechos de camarón**

■ *Ácidos grasos poliinsaturados*

■ Los ácidos grasos poliinsaturados son **compuestos lipofílicos** con cadenas de tamaño variable. Poseen dobles enlaces, los cuales han sido relacionados con la reducción de la inflamación, prevención de problemas del corazón, reducción de colesterol en la sangre, así como con una posible protección de la piel contra el daño causado por los rayos uv. El

grupo de ácidos grasos poliinsaturados más estudiado es el perteneciente a los omega-3. El consumo de alimentos ricos en este tipo de compuestos se ha relacionado con la prevención y tratamiento de algunas patologías, por ejemplo, cáncer (Wei y cols., 2022).

Pigmentos

Los pigmentos son un grupo complejo de compuestos presentes en diversas matrices, como frutas, vegetales, microorganismos y desechos de crustáceos. Den-

Compuestos lipofílicos
Compuestos químicos que, debido a su estructura, tienen una alta afinidad para unirse a las grasas, aceites, lípidos o entornos no polares, mezclándose bien en disolventes orgánicos.

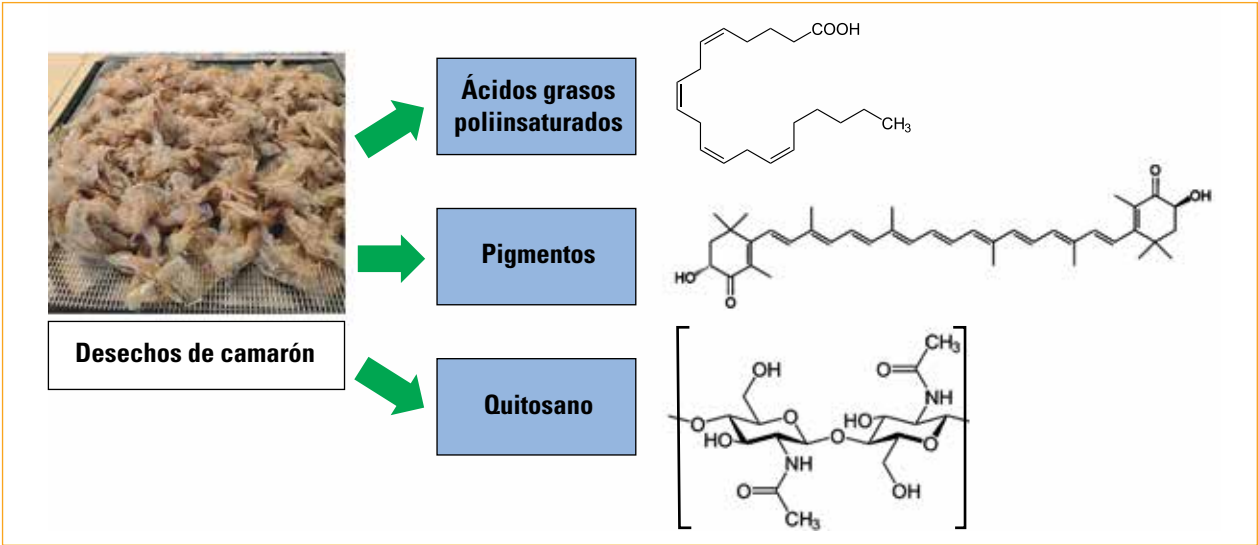


Figura 2. Compuestos bioactivos presentes en los desechos de camarón.

tro de éstos, podemos mencionar a la clorofila, las antocianinas, los flavonoides, los carotenoides, entre otros. La astaxantina es un carotenoide ampliamente estudiado debido a sus características estructurales. Posee grupos hidroxilos y carbonilos en la cadena terminal, los que le confieren la capacidad de aceptar o donar electrones a otras moléculas químicamente inestables, logrando con esto estabilizarlas y evitando el llamado estrés oxidativo. Esta capacidad antioxidante de la astaxantina protege a las células del daño causado por diferentes enfermedades, entre ellas el cáncer (Mathew y cols., 2020).

Quitosano

El quitosano es un **biopolímero** obtenido de la desacetilación de la quitina, la cual se obtiene mediante síntesis química o a partir de fuentes naturales poco utilizadas, como insectos y desechos de crustáceos. La quitina obtenida a partir de desechos de camarón se ha estudiado para su transformación en quitosano, debido a que estos desechos son una fuente abundante y potencialmente contaminante, por lo que su utilización reduciría el riesgo de daño ambiental. En este sentido, se ha reportado la utilización de quitosano para la obtención de hidrogeles y nanopartículas, los cuales son utilizados en terapia dirigida contra diversos tipos de cáncer (Liang y cols., 2022).

El cáncer y la importancia de prevenirlo

El cáncer es una enfermedad multifactorial causada por el crecimiento anormal y acelerado de células capaces de extenderse e invadir otros órganos diferentes al de su origen. Esta enfermedad es considerada como la principal causa de muerte a nivel mundial. Según datos de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el año 2020 se reportaron más de 10 millones de muertes relacionadas con esta enfermedad. Asimismo, se diagnosticaron más de 19.3 millones de casos de nuevos pacientes con algún tipo de cáncer (Faraone y cols., 2020; Pal y cols., 2022). Los hombres son los más propensos a desarrollar esta enfermedad; además, presentan la mayor tasa de mortalidad en comparación con las mujeres. Según reportes, 1 de cada 5 hombres pre-

sentará algún tipo de cáncer y 1 de cada 8 hombres con cáncer fallece en el mundo cada año, mientras que, en mujeres, 1 de cada 6 presentará algún tipo de cáncer y 1 de cada 11 mujeres con cáncer fallece (Faraone y cols., 2020).

Las principales estrategias para combatir el cáncer son: quimioterapia, radioterapia, cirugía y terapia dirigida. Sin embargo, en años recientes se ha investigado sobre nuevas alternativas de tratamiento, con el fin de contrarrestar los efectos secundarios provocados por los tratamientos comúnmente utilizados. En este sentido, los productos naturales han sido de gran interés en la sociedad, debido a que su uso empírico ha demostrado un gran potencial en la prevención y tratamiento de diversas enfermedades no transmisibles, como por ejemplo el cáncer. Por esta razón las investigaciones se han orientado a estudiar compuestos bioactivos de distintas fuentes, así como los procesos de extracción de éstos (Faraone y cols., 2020; Wei y cols., 2022).

Se ha descrito en la literatura que compuestos como los ácidos fenólicos, flavonoides, carotenoides y ácidos grasos poliinsaturados (del grupo de los omega-3) previenen el desarrollo, crecimiento y propagación de las células cancerígenas y pueden ser coadyuvantes en los tratamientos tradicionales (mejoran la eficacia de la radioterapia y de los fármacos quimioterapéuticos convencionales sobre células tumorales), reduciendo la incidencia y muerte a causa de esta enfermedad (Faraone y cols., 2020; Pal y cols., 2022; Wei y cols., 2022). En el caso de la terapia dirigida, los biopolímeros como la quitina y el quitosano han sido utilizados para estimular el sistema inmunológico, como inductores de factores proinflamatorios, así como para mejorar el transporte y la absorción de compuestos con actividad anticancerígena (Liang y cols., 2022).

¿Qué tipos de cáncer podrían prevenir los compuestos obtenidos a partir de desechos de camarón?

Los desechos de camarón son fuente importante de ácidos grasos poliinsaturados (ácidos grasos pertenecientes al grupo omega-3), pigmentos (principalmen-

Biopolímeros

Macromoléculas complejas naturales producidas por los organismos vivos debido a procesos fermentativos o mediante biomasa; algunos ejemplos son la celulosa, el almidón, la quitina y proteínas, entre otros.

te astaxantina) y quitina (precursor de quitosano). Datos reportados por Wei y cols. (2022), en estudios preclínicos, mostraron que el consumo de ácidos grasos poliinsaturados del grupo de los omega-3 evitó la pérdida de peso, inflamación y fatiga de pacientes en tratamiento contra algún tipo de cáncer; además, disminuyeron la incidencia y mortalidad de la enfermedad (véase la **Tabla 1**). Asimismo, Faraone y cols. (2020) reportaron el potencial de la astaxantina en algunos modelos celulares de cáncer (**Tabla 1**), entre ellos: cervicouterino, colon, estómago, garganta, hígado, mama, piel y próstata. Además, la astaxantina mostró potencial para prevenir y reducir tumores en **modelos murinos** y estudios

preclínicos. Por otro lado, Liang y cols. (2022) demostraron que en modelos celulares y murinos el quitosano tiene potencial para prevenir y reducir el crecimiento de tumores en órganos como cerebro, colon, garganta, hígado y mama.

Por lo tanto, los desechos de camarón son fuente de compuestos con actividad anticancerígena *in vitro* demostrada en modelos celulares de cáncer cervicouterino, cáncer de colon, cáncer de garganta, cáncer de hígado, cáncer de mama, cáncer de piel, cáncer de próstata y leucemia, entre otros. Mientras que a nivel *in vivo*, en ensayos murinos y preclínicos, se comprobó que pueden disminuir el riesgo de padecer cáncer, así como reducir la presen-

Modelos murinos
Estudios en los que se utilizan ratones o ratas con fines científicos o médicos, debido a que tienen elementos comunes con el genoma humano, así como similitudes fisiológicas.

Tabla 1. Actividad anticancerígena de compuestos obtenidos a partir de desechos de camarón (Faraone y cols., 2020; Liang y cols., 2022; Wei y cols., 2022).

Tipo de cáncer	Compuesto estudiado	Modelo
Cerebral	Hidrogel de quitosano	Línea celular U-87 MG; murino.
Cervicouterino	Astaxantina	Línea celular HeLa.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Línea celular.
	Hidrogel y nanopartículas de quitosano	Línea celular TC-1; murino y preclínico.
Colon	Astaxantina	Líneas celulares HCT116, HT-29, CaCo-2 y LS-180; murino y preclínico.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Preclínico.
	Hidrogel y nanopartículas de quitosano	Línea celular CT26; murino.
Estómago	Astaxantina	Línea celular KATO-III y SNU-1.
Garganta	Astaxantina	Línea celular TE-1 y TE-4.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Preclínico.
	Nanopartículas de quitosano	Línea celular Luc-B16F10.
Hígado	Astaxantina	Líneas celulares AH109A, CBRH-7919, HepG2 y H22; murino y preclínico.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Línea celular.
	Nanopartículas de quitosano	Líneas celulares B16, H22 y Hepa1-6; murino.
Leucemia	Astaxantina	Línea celular K562 y HL-60.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Preclínico.
Mama	Astaxantina	Líneas celulares MCF-7 y MDA-MB-231; murino.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Preclínico.
	Nanopartículas de quitosano	Líneas celulares EMT6, MCF-7 y 4T1; murino.
Piel	Astaxantina	Líneas celulares A2058, A375 y JB6 P+; murino.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Línea celular.
Próstata	Astaxantina	Línea celular LNCap-FGC; murino.
	Ácidos grasos poliinsaturados	Preclínico.

cia de tumores; esto, al incluirlos como adyuvantes en el tratamiento tradicional de pacientes con cáncer cerebral, cáncer de colon, cáncer de estómago, cáncer de garganta, cáncer de hígado, cáncer de mama, cáncer de piel y cáncer de próstata (véase la **Tabla 1**) (Faraone y cols., 2020; Liang y cols., 2022; Wei y cols., 2022).

Perspectivas de la utilización de los desechos de camarón en cáncer

El cáncer es una de las patologías con mayor incidencia y mortalidad a nivel mundial. Actualmente, los tratamientos utilizados contra esta enfermedad provocan efectos secundarios que derivan en problemas de salud graves; por este motivo, se han estudiado alternativas naturales que puedan prevenir y combatir esta enfermedad, con un menor riesgo a la salud (Pal y cols., 2022). En este sentido, los alimentos ricos en compuestos bioactivos, como ácidos grasos poliinsaturados y carotenoides, entre otros, han sido reportados como una estrategia potencial para combatir esta enfermedad (Faraone y cols., 2020; Liang y cols., 2022; Wei y cols., 2022). Asimismo, múltiples reportes mencionan que los desechos de camarón son una rica fuente de compuestos que inhiben el crecimiento de células cancerígenas y coadyuvan en el tratamiento de distintos tipos de cáncer

(Liang y cols., 2022; Mathew y cols., 2020). Nuestro país produce grandes volúmenes de este desecho que no se utilizan y se han convertido en un grave problema ambiental. Por lo tanto, es necesario crear estrategias para la reutilización de estos desechos; por ejemplo, para la obtención de compuestos bioactivos con potencial como adyuvantes en el tratamiento de cáncer, lo cual representaría una gran oportunidad de desarrollo económico y social.

Luis Angel Cabanillas Bojórquez

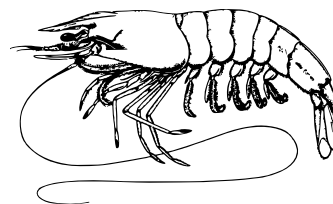
Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
luis.cabanillas@ciad.mx

Marilyn Shomara Criollo Mendoza

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
marilyn.criollo@ciad.mx

José Basilio Heredia

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo.
jbheredia@ciad.mx



Lecturas recomendadas

Faraone, I., C. Sinisgalli, A. Ostuni, M. F. Armentano, M. Carmosino *et al.* (2020), "Astaxanthin anticancer effects are mediated through multiple molecular mechanisms: A systematic review", *Pharmacological Research*, 155:104689. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.phrs.2020.104689>>, consultado el 28 de marzo de 2025.

Liang, X., M. Mu, R. Fan, B. Zou y G. Guo (2022), "Functionalized chitosan as a promising platform for cancer immunotherapy: A review", *Carbohydrate Polymers*, 290:119452. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119452>>, consultado el 28 de marzo de 2025.

Mathew, G. M., D. C. Mathew, R. K. Sukumaran, R. Sindhu, C.-C. Huang *et al.* (2020), "Sustainable and eco-friendly strategies for shrimp shell valorization",

Environmental Pollution, 267:115656. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115656>>, consultado el 28 de marzo de 2025.

Pal, S., A. Sharma, S. P. Mathew y B. G. Jaganathan (2022), "Targeting cancer-specific metabolic pathways for developing novel cancer therapeutics", *Frontiers in Immunology*, 13. Disponible en: <<https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.955476>>, consultado el 28 de marzo de 2025.

SIAP (2022), "Panorama agroalimentario 2022", México, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera.

Wei, L., Z. Wu y Y. Q. Chen (2022), "Multi-targeted therapy of cancer by omega-3 fatty acids-an update", *Cancer Letters*, 526:193-204. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.canlet.2021.11.023>>, consultado el 28 de marzo de 2025.

Víctor Jesús Albores Flores, Julieta Grajales Conesa y José Alfonso López García

Endulzando las prácticas agrícolas

La miel tiene un gran potencial como bioproducto en la agricultura, y si bien se conocen muchas de sus propiedades medicinales en el campo de la salud humana y la nutracéutica, son escasos los estudios que abordan su uso en la agricultura. Sin embargo, actualmente la miel de los meliponinos ya se utiliza como complemento en fertilización foliar, adherente, atrayente y componente de biopelículas, entre otros, a nivel poscosecha y de campo. En este artículo se comenta cómo la miel de las abejas sin aguijón puede utilizarse como parte de los bioproductos para el control de plagas y enfermedades de cultivos y frutos.

Introducción

La producción de alimentos inicia en el campo, donde muchos procesos biológicos se llevan a cabo antes de que aquéllos puedan llegar a la mesa. Las etapas previas incluyen la siembra del cultivo en el campo, su cosecha, transporte, empaque, almacenamiento y distribución. En todos los procesos antes mencionados los productos están expuestos a posibles contaminantes debido a su manejo, riesgos que incluyen el contacto con equipo y materiales. Estos contaminantes son microorganismos, sustancias tóxicas, desechos del cultivo o de la planta, sudor y grasa, entre otros.

Para lograr la sustentabilidad del paso del campo a la mesa, debemos trabajar en el cuidado de la semilla desde la siembra, el cultivo de las plantas, su desarrollo, la floración y el amarre de frutos (después de la fecundación de la flor). Se requiere, pues, de una serie de eventos y productos que participan en cada una de las etapas descritas. Estos productos sirven para que nuestra planta o árbol crezca, llegue a la edad adulta para reproducirse y así generar flores y frutos. Para lograrlo, es necesario que se efectúen actividades o prácticas agrícolas, y los productos utilizados en ellas son, en su mayor parte, de naturaleza química sintética. Entre los productos que comúnmente se usan en la agricultura, pocos son los de origen natural (de naturaleza microbiana, mineral o vegetal).



Una de las razones para trabajar con productos de origen natural es que rara vez impactan negativamente sobre la diversidad biológica (animales, insectos, microorganismos y plantas) de los sistemas agrícolas –conocidos como agroecosistemas–. La mayoría de los productos de origen natural utilizados mejoran la humedad del suelo y del ambiente, protegen la condición nutrimental y microbiana del suelo, y mantienen por debajo el nivel de los daños que presentan las plantas producidos por los insectos plaga o los microorganismos patógenos que ocasionan enfermedades en las plantas. Los productos naturales promueven la inducción de defensas de las mismas plantas –como si fueran vacunas–, inducen floración, promueven la polinización, la emisión de hojas y raíces, el amarre de frutos o semillas, mejoran el crecimiento de las plantas y árboles, promueven una mejor interacción entre los cultivos y la biodiversidad de los organismos que habitan y cohabitan en el área cultivada. Por lo anterior, todos los integrantes del agroecosistema salen beneficiados, incluido el ser humano que participa en el manejo agrícola.

Diversos microorganismos como hongos, bacterias, extractos vegetales acuosos, alcohólicos y caldos minerales para el control de plagas, enfermedades, biofertilizantes y actualmente productos de la colmena como miel y propóleos ya se suman a la lista de bioproductos con aplicación agrícola.

La miel

Proveniente del néctar y polen de las flores, así como de las sustancias del tracto digestivo de las abejas, la miel pasa por un periodo de maduración dentro de la colmena, donde pierde humedad y los compuestos y bioproductos se modifican. Es reconocida como un producto alimenticio que se utiliza en una gran variedad de alimentos y postres, ya que mejora el sabor, textura y valor nutrimental de los platillos. Este producto proviene de un trabajo organizado de insectos, en el que la abeja reina es responsable de proveer de crías a toda la colmena y, finalmente, a su sustituta, en un proceso con niveles muy altos de jerarquización y especificidad en las actividades.

En la recolección las abejas brindan un servicio de polinización indispensable para que la mayoría de las plantas puedan reproducirse, pues transportan y enriquecen este néctar con las enzimas propias que tienen en su boca y otras sustancias que evitan el crecimiento de microorganismos, como levaduras y bacterias.

Para la obtención y extracción de los productos de la colmena, una vez que se encuentran listos para su procesamiento y aplicación en la agricultura, se toman directamente de **cajas racionales** que se utilizan para que las abejas nativas trabajen en ellas y provean al ser humano de sus productos.

Usos y aplicaciones

Además de los usos en el ámbito alimentario para endulzar paladares y corazones, desde épocas ancestrales la miel se utiliza en la medicina para prevenir y contrarrestar infecciones bacterianas y virales, incluso para la curación de heridas de pie diabético, como **antitusígeno** y para incrementar la actividad del sistema inmunológico. En el campo de la cosmética la miel se utiliza como ingrediente de cremas humectantes y protectores solares, entre otros.

Son pocos los estudios que se han realizado –publicados– sobre el uso de la miel en la agricultura. A diferencia de la miel de la *Apis mellifera*, que es elaborada por abejas de tamaño normal, la miel de los meliponinos –abejas más pequeñas, aproximadamente 10 veces menores en tamaño en comparación con la *Apis*– tiene un valor alto en el mercado porque la cantidad elaborada es menor y cuesta más obtener 50 ml por colmena. En este sentido, este tipo de miel no parecería viable para su uso en la agricultura. Sin embargo, estas abejitas son similares al personaje de David, quien enfrentó a Goliat, pues su esfuerzo y dedicación conlleva una mayor cantidad de propiedades, lo que hace que esta miel tenga más usos.

Dado lo antes expuesto, sería difícil imaginar que la miel –producida tanto por la abeja *Apis mellifera* como por meliponinos– pudiera utilizarse en las actividades diarias del manejo agrícola, ya sea en invernadero, en la etapa de poscosecha y de producción en el campo. De hecho, hasta antes del año 2000

Cajas racionales
Cajas de madera que sirven de colmena para la colonia de abejas, de modo que ya no utilicen los árboles como resguardo.

Antitusígeno
Sustancia que sirve para disminuir la frecuencia de la tos en el ser humano.



Figura 1. Recolección de miel de apiarios de meliponinos. *a)* Protección para la recolección, y *b)* nido de *Melipona beecheii*.



Figura 2. Abeja del grupo de *Melipona solani*. Aplicaciones en la agricultura.

era impensable ponerle miel a una solución de fertilizante, a una solución de plaguicida, químico o biológico. Los productores agrícolas no podían concebir la idea de endulzar sus prácticas, mucho menos de utilizar la miel de meliponinos –la cual tiene un mayor costo– y mezclarla con su producto para alimentar a las plantas o protegerlas de insectos o patógenos. Tradicionalmente se pensaba que si se aplicaba miel a un cultivo se llenaría de hormigas y afectarían a las plantas. Pero suele suceder que entre más nos adentramos en el conocimiento de la naturaleza, nos damos cuenta de que menos sabemos de ella y desperdiciamos herramientas muy valiosas, como la miel.

Por primera vez en una revista científica en México, a partir del 2001, se reportó el uso de miel de abeja *Apis* como complemento nutrimental de plántulas de tomate con la finalidad de obtener plantas de alto vigor y buena calidad de trasplante (Villegas Torres y cols., 2001).

Se prepararon 120 espacios en charolas germinadoras de unicel usando como sustrato tezontle y composta de tule y lirio, donde se sembraron semillas de tomate (*Solanum lycopersicum*) var. Río Grande. Los tratamientos fueron: 1) tezontle, sustrato y composta; 2) riego con solución Steiner al 50 %, con miel de abeja al 1 % y sin miel de abeja; 3) aplicación foliar (a las hojas) de miel de abeja al 2 % y sin ella. Los resultados demostraron que la aplicación foliar de miel de abeja al 2 % incrementó la altura de la planta en 138.4 % cuando se utilizó tezontle como sustrato, y en 40 % cuando se utilizó composta; el diámetro del tallo se incrementó de 0.37 a 0.80 cm, así como la absorción de N (nitrógeno), P (fósforo), K (potasio); además de que el área foliar se duplicó en las plántulas rociadas con miel y se incrementó ocho veces al combinarse la aplicación de miel de abeja vía foliar y en el riego.

En el crecimiento de *Lilium* también se realizó una aplicación foliar, pero esta vez fue para darle de



comer por las hojas a estas plantas y por las raíces. Betancourt-Olvera y cols. (2005) utilizaron aplicación foliar de miel, junto con una fertilización al suelo, y encontraron que con el uso de la miel en aplicación foliar la planta alcanzaba una mayor altura, un mayor número de hojas y fue mayor el diámetro del tallo de la planta, a diferencia del tratamiento en que no recibieron miel de forma foliar. En el tratamiento sin miel, donde únicamente se aplicó fertilizante, la planta tuvo más peso, tanto en seco como sin secarla. Los autores indican que la miel puede ser un promotor en el desarrollo de órganos de la planta (algo similar a lo que hacen las vitaminas en el cuerpo humano), pues al analizar químicamente las plantas sometidas a ambos tratamientos, se encontró que la cantidad de nutrimentos era la misma.

En aplicaciones foliares se utilizó miel de abeja acompañada con silicio para brindar protección a las plantas de tomate de la marchitez ocasionada por un hongo llamado *Fusarium oxysporum*. Este mal

se produce después de llevar las plantitas de tomate salidas de un vivero, colocarlas en agujeros en el suelo y taparlos, a nivel de campo. Estos investigadores (Gómez-Camacho y cols., 2006) observaron que al aplicar fertilizante triple 17 se murieron el 65 % de las plantas; en cambio, donde se aplicó fertilizante más sílice adicionado con miel, únicamente se murieron el 50 % de las plantas sembradas en el campo. El análisis nutrimental reveló que ambos tratamientos fueron similares en ese aspecto. La producción de frutos fue mayor en el tratamiento con miel, por tener más plantas vivas y sanas.

La miel puede mezclarse con soluciones de calcio y en esta investigación Rodríguez Mendoza y cols. (2015) lo utilizaron para mejorar la calidad del fruto de tomate, logrando un aumento de peso del fruto, de sólidos solubles, acidez titulable, licopeno y vitamina C, gracias a las aspersiones de calcio y de miel al 2 %. En la etapa de poscosecha –después de cortar el fruto– para mango de la variedad



Control de trips
Procedimiento utilizado para el control de un insecto conocido con este nombre y que es una plaga que daña con mordeduras la flor y el fruto del mango, ocasionando heridas por donde entran patógenos.

Tommy Atkins, Valencia Ramos (2018) informa el uso de miel como agente protector y conservador en la deshidratación del mango, lo que permitió una deshidratación rápida, retuvo por más tiempo la humedad, evitó la pérdida rápida del color amarillo rojizo del fruto y mantuvo por más tiempo una buena textura.

La inhibición de hongos en el ámbito científico y en el campo implica el uso de productos químicos, aunque actualmente existe como alternativa a estos métodos la evaluación de las mieles de abeja sin aguijón contra una especie de *Candida* –patógeno que afecta a los seres humanos (Caramello y cols., 2019)–. También se evaluó en el crecimiento de hongos filamentosos, como es el caso del fitopatógeno *Colletotrichum*, que afecta a una infinidad de cultivos. En el caso de este último patógeno, se utilizó miel de abeja sin aguijón, de los géneros *Melipona* y *Scaptotrigona* (Albores-Flores y cols., 2018), y los resultados mostraron un efecto inhibitorio sobre el crecimiento micelial de la colonia, con una reducción en su crecimiento del 40 %, en comparación con el crecimiento de esta misma cepa en un medio sin miel, en un lapso de 12 días. Lo anterior se relacionó con la actividad antifúngica ejercida por

el producto comercial conocido como Clorotalonil (muy usado por los productores).

Actualmente, en la escuela de sistemas alimentarios se está utilizando la miel como adherente –para fijar un tratamiento líquido o en polvo a las hojas de las plantas– en el proceso de **control de trips** en el cultivo del mango, lo que ha dado lugar a un aumento en la eficiencia de los extractos vegetales utilizados para el control de este insecto plaga. En el mismo cultivo se utilizó también la miel como adherente mezclado con extractos vegetales acuosos para la inducción de brotes florales, con lo cual se logró un aumento en el número de brotes del 15 %, en comparación con los resultados del uso del inductor químico denominado nitrato de potasio. La miel se aplicó de forma directa en los árboles de mango luego de la aparición de brotes florales, lo cual tuvo el efecto de atraer insectos polinizadores, como las abejas grandes y pequeñas, meliponas y trigonas, entre otras. La miel aplicada de forma foliar, antes de la floración, también tiene un efecto de inductor floral, promoviendo la emisión de brotes florales y la maduración de flores, antes de que se presente en las panículas que fueron inducidas con nitrato de potasio (Figura 3).



Figura 3. Aplicación de productos agrícolas con miel para el control de trips del cultivo de mango.

Conclusión

La miel como producto alimenticio utilizado por sus propiedades para la salud humana, gracias a sus biomoléculas con bioactividad variada, es una fuente potencial de usos y aplicaciones que no se limitan a ciertas áreas industriales. Por lo antes expuesto, la miel presenta potencial para ser usada en el área agroindustrial y mejorar la calidad de los procesos fitosanitarios y el manejo agrícola de los cultivos, lo cual contribuiría a la disminución del uso de productos químicos.

Víctor Jesús Albores Flores

Escuela de Sistemas Alimentarios, Universidad Autónoma de Chiapas.

alboresflores@gmail.com

Julieta Grajales Conesa

Escuela de Sistemas Alimentarios, Universidad Autónoma de Chiapas.

julieta.grajales@unach.mx

José Alfonso López García

Escuela de Sistemas Alimentarios, Universidad Autónoma de Chiapas.

jose.lopez@unach.mx



Referencias específicas

- Albores-Flores, V., I. J. Marín-Saenz, J. A. López-García, A. Sánchez-Gutiérrez y J. Grajales-Conesa (2018), "Propiedad antifúngica de mieles sobre el desarrollo *in vitro* de *Colletotrichum gloeosporioides*", *Revista Mexicana de Fitopatología*, 36(3):423-431. Disponible en: <<https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1805-3>>, consultado el 17 de abril de 2025.
- Betancourt-Olvera, M., M. N. Rodríguez-Mendoza, M. Sandoval-Villa y E. A. Gaytán-Acuña (2005), "Fertilización foliar, una herramienta en el desarrollo del cultivo de *lilium* cv. Stargazer", *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 11(2):371-378.
- Caramello, A. E., F. Zamudio, L. F. A. Ercole y M. A. Peralta (2019), "Actividad antifúngica de miel de una especie de *Melipona* nativa (*Plebeia catamarcensis*) frente a *Candida albicans* resistente", XXII Jornadas Científicas de la Sociedad de Biología de Córdoba, Argentina.
- Gómez-Camacho, R., M. N. Rodríguez-Mendoza, E. Cárdenas-Soriano, M. Sandoval Villa y M. T. Colinas de León (2006), "La fertilización foliar de silicio y miel de abeja como alternativas para el control de marchitez (*Fusarium oxysporum* Brot.) en tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.)", *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 12(1):69-75.
- Rodríguez-Mendoza, M. N., G. Baca-Castillo, J. L. García-Cué y J. A. Urrieta-Velázquez (2015), "Aclareo de frutos y aspersiones foliares de calcio y miel de abeja sobre la calidad de tomate tipo costilla", *Revista Fitotecnia Mexicana*, 38(2):197-204. Disponible en: <http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0187-73802015000200010&lng=es&tlng=es>, consultado el 17 de abril de 2025.
- Valencia Ramos, M. J. (2018), *Efecto de la miel en la deshidratación del mango (Mangifera indica) variedad Tommy Atkins*, tesis de licenciatura en Agroindustria Alimentaria, Escuela Agrícola Panamericana, Honduras.
- Villegas Torres, O. G., M. N. Rodríguez Mendoza, L. I. Trejo Téllez y G. Alcántar (2001), "Potencial de la miel de abeja en la nutrición de plántulas de tomate", *Terra Latinoamericana*, 19(1):97-102.

Luis Hernández-Adame y Gabriela Palestino

Nanopartículas luminiscentes y nuevos campos biotecnológicos de los lantánidos

La nanotecnología ha permitido producir nanopartículas basadas en lantánidos, las cuales son utilizadas para desarrollar biosensores, biomarcadores y recientemente como vehículos para transportar y liberar fármacos. En este sentido, este artículo presenta un breve resumen de cómo ha evolucionado este proceso, por qué se ha seleccionado a los lantánidos y cuáles son los más recientes avances en el campo biotecnológico.

Lantánidos y procesos luminiscentes

Dentro de la tabla periódica, en la parte inferior, se encuentran dos bloques de elementos que raramente se estudian en los cursos de química. Uno de ellos corresponde a los lantánidos, o lantanoides, un grupo de elementos con características ópticas muy interesantes y que son ampliamente utilizados en la fabricación de dispositivos electrónicos. Pero, ¿qué sabes sobre los lantánidos? ¿Por qué resulta inquietante estudiarlos?

Los lantánidos son un grupo de 14 elementos químicos cuyos números atómicos van desde el 58 (cerio, Ce) al 71 (lutecio, Lu); en la tabla periódica se ubican en el periodo 6, pertenecen junto con la tríada del escandio (Sc), itrio (Y) y lantano (La) a las tierras raras, que comparten características fisicoquímicas similares. Se denominan lantánidos porque se asemejan al lantano.

Químicamente, los compuestos formados por tierras raras son muy estables, a excepción del prometio (Pm, 61) que es radiactivo; algunos de ellos presentan diversos **estados de oxidación** (Nd^{2+} , Nd^{3+} y Nd^{4+}), siendo los de estado trivalente los más comunes e interesantes debido a que, gracias a su configuración electrónica, presentan alta capacidad de emitir luz visible cuando son excitados con luz ultravioleta (UV) o luz infrarroja (IR). A este proceso se le conoce como “fotoluminiscencia”. En cristales inorgánicos con presencia de tierras raras (por ejemplo, el óxido de terbio, óxido de gadolinio, etc.), el fenómeno de fotoluminiscencia puede llevarse a cabo mediante dos rutas: 1) conversión descendente (CD), y 2) conversión ascendente (CA).

Estados de oxidación

Se refiere a un número que permite saber cuántos electrones ha perdido o ganado un átomo cuando forma parte de un compuesto.



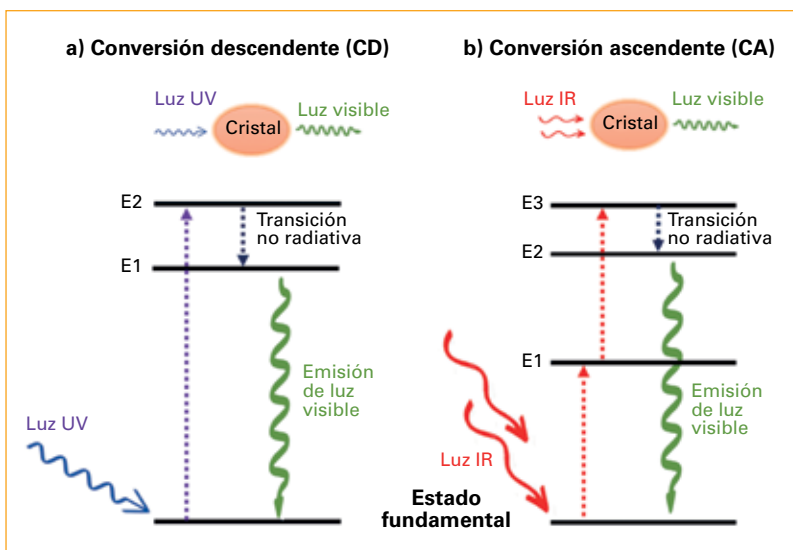


Figura 1. Mecanismos de conversión descendente (cd) y conversión ascendente (ca) involucrados en los procesos de fotoluminiscencia. Elaborada por los autores.

Por la ruta de CD, el proceso comienza cuando la luz utilizada como fuente de excitación (luz UV) es dirigida hacia la muestra, y a través de un proceso denominado de “fotoexcitación” los electrones del material ubicados en su estado fundamental absorben el exceso de energía y son promovidos a estados excitados de mayor energía dentro del mismo cristal (nivel E2 de la **Figura 1a**). Sin embargo, los electrones excitados no pueden permanecer en estos estados por mucho tiempo, por lo que regresan a su estado de equilibrio por medio de la liberación del exceso de energía a través de la emisión, o no, de luz visible (transiciones radiativas o no radiativas).

En el proceso de CA el mecanismo usualmente emplea luz IR como fuente de excitación, que se convierte en luz visible durante la emisión. A simple vista, podría interpretarse que la diferencia entre CD y CA es solamente el tipo de excitación que se utiliza; sin embargo, el proceso de CA resulta un poco más complejo debido a que los fotones de emisión son de mayor energía que los fotones absorbidos durante la excitación. Este proceso aparentemente rompe las leyes de la física, pero puede llevarse a cabo debido a un fenómeno óptico denominado “dispersión anti-Stokes” que consiste en la absorción de fotones de luz IR por un átomo sensibilizador que promueve a los electrones a un estado excitado (E1) desde su

estado fundamental (**Figura 1b**). Posteriormente, otro fotón IR puede ser absorbido por el mismo átomo y promueve los electrones a un segundo nivel de energía superior (E3), desde el cual se induce una transición radiativa de alta energía que da origen a la emisión de un fotón de luz visible.

Hasta la fecha, una gran cantidad de cristales inorgánicos, tales como los vanadatos, fosfatos, óxidos o sulfuros, han sido modificados intencionalmente introduciendo pequeñas cantidades de átomos de tierras raras dentro de su matriz principal o matriz anfitrión (técnica conocida como dopaje), para incrementar su eficiencia en los procesos luminiscentes. Ésta es una de las razones por las cuales estos materiales son muy utilizados para la construcción de dispositivos de alta tecnología.

■ **Nanopartículas fotoluminiscentes: usos, retos y nuevas aplicaciones biotecnológicas**

Los materiales que poseen importantes propiedades ópticas constituyen un tema que ha motivado numerosas investigaciones debido a su uso potencial en el desarrollo de **dispositivos optoelectrónicos**. Se han utilizado en la fabricación de discos duros, motores de inducción, turbinas de viento, láseres, lámparas LED, pantallas, celulares, etc. Sin embargo, en los últimos 10 años, la nanotecnología ha permitido la miniaturización de los materiales a tal grado que es posible fabricar nanopartículas fotoluminiscentes con alta eficiencia, que son ampliamente utilizadas en biotecnología para el desarrollo de biosensores en la detección de moléculas, marcación celular, obtención de imágenes de tejidos y recientemente como vehículos para transportar y liberar fármacos.

Para fines biotecnológicos, es recomendable que las nanopartículas tengan tamaños menores de 100 nanómetros (10^{-9} metros) y sean monodispersas en formas y tamaños, ya que estos factores influyen considerablemente en su biodistribución, acumulación, eliminación e interacción con células o tejidos. Además, es importante señalar que el uso de luz IR como fuente de excitación es una ventaja muy significativa sobre otro tipo de sistemas, debido a que la región de la luz IR (conocida como la “ventana biológica”) no

Dispositivos optoelectrónicos
Dispositivos capaces de convertir luz en electricidad o electricidad en luz. Son muy utilizados en sistemas electrónicos.

induce ningún efecto negativo en células o tejidos, hecho que permite visualizar, en tiempo real, la distribución de estos agentes en el organismo tratado sin efectos secundarios por el uso de luz de alta energía.

Actualmente, existe una gran cantidad de partículas luminiscentes; sin embargo, las nanopartículas basadas en tierras raras presentan ventajas sobre las demás. Este hecho se debe a que, por ejemplo, comparándolas con materiales como puntos cuánticos (nanopartículas semiconductoras muy pequeñas, cuyo tamaño oscila entre los 2 y los 10 nanómetros) o colorantes orgánicos, las tierras raras tienen estrechas bandas de emisión que ayudan a minimizar las posibles interferencias originadas por la autoluminiscencia de los propios objetos de análisis (tejidos, células, etc.). Además, presentan menores niveles de toxicidad, mejor biodistribución, mayor fotoestabilidad y mayor estabilidad química y térmica, lo que permite obtener ensayos en sistemas biológicos más finos y selectivos.

Varias matrices dopadas con tierras raras han sido utilizadas para aplicaciones en detección y biomarcación. Sin embargo, en nuestro grupo de investigación de Biopolímeros y Nanoestructuras –adscrito a la Facultad de Ciencias Químicas (FCQ) y al Centro de Investigación en Ciencias de la Salud y Biomedicina (CICSAB) de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)–, en colaboración con el grupo de Nanotecnología del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), hemos desarrollado matrices ricas en gadolinio con altas propiedades ópticas y potencial aplicación biotecnológica. El ion gadolinio (Gd^{3+}) presenta excelentes propiedades ópticas, pero además tiene propiedades magnéticas que permiten extender sus aplicaciones al desarro-

llo de sistemas utilizados como agentes de contraste en imagenología por neutrones o resonancia nuclear magnética, o bien como dosímetros termoluminiscentes para cuantificar la dosis absorbida de radiación ionizante (Ortega-Berlanga y cols., 2021). En este sentido, hemos comprobado que nanopartículas de óxidos y oxisulfuros de gadolinio (Gd_2O_3 y Gd_2O_3S , respectivamente) tienen una alta estabilidad química y térmica con excelentes propiedades ópticas; además, dopándolas con diferentes iones lantánidos trivalentes como el Tb^{3+} , Yb^{3+} , Er^{3+} o Eu^{3+} , son matrices capaces de inducir eficientemente procesos de CD y CA durante la emisión luminiscente.

En relación con su producción, también es importante saber que existen varios desafíos que afectan directamente la eficiencia de emisión. La fotoluminiscencia depende de la movilidad de los electrones y sus transiciones a diferentes niveles energéticos dentro del cristal. Cuando se presentan impurezas en los cristales, éstas interfieren con la calidad de la estructura producida, incorporando defectos en el cristal (intersticios, vacancias, etc.) que afectan la emisión. Incluso, es posible que algunos residuos del proceso de síntesis adsorbidos sobre la superficie de la nanopartícula puedan atrapar los electrones y afectar considerablemente la eficiencia e intensidad luminiscentes. Para abordar estos retos, se han evaluado diferentes rutas de síntesis que incluyen **métodos solvotermales**, hidrotermales e incluso irradiación por microondas, y se ha encontrado que la ruta hidrotermal puede ser uno de los métodos más convenientes debido a la calidad de partículas que se obtienen: con poca distribución de tamaños, pocos defectos y formas más homogéneas. Algunos ejemplos se muestran en la **Figura 2** (Hernández-Adame y cols., 2014).

Métodos solvotermales

Son técnicas de síntesis química, utilizadas para producir nanopartículas usando solventes a alta presión y temperatura.

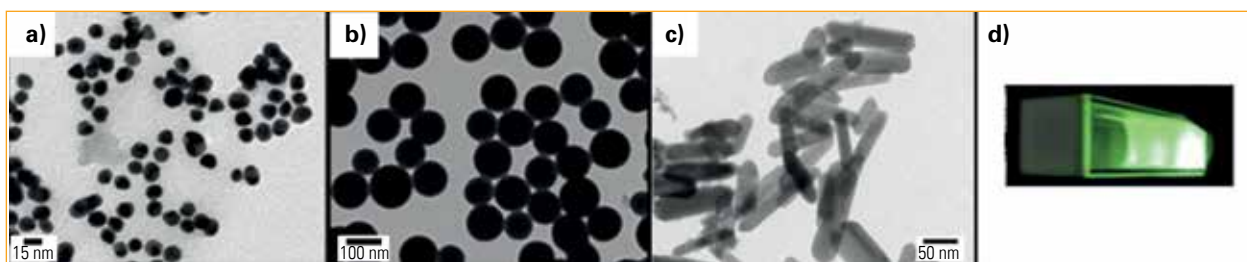


Figura 2. Las imágenes a)-c) corresponden a nanopartículas a base de gadolinio con diferentes formas. La imagen d) es una fotografía que muestra la intensidad de emisión durante el proceso de fotoluminiscencia.

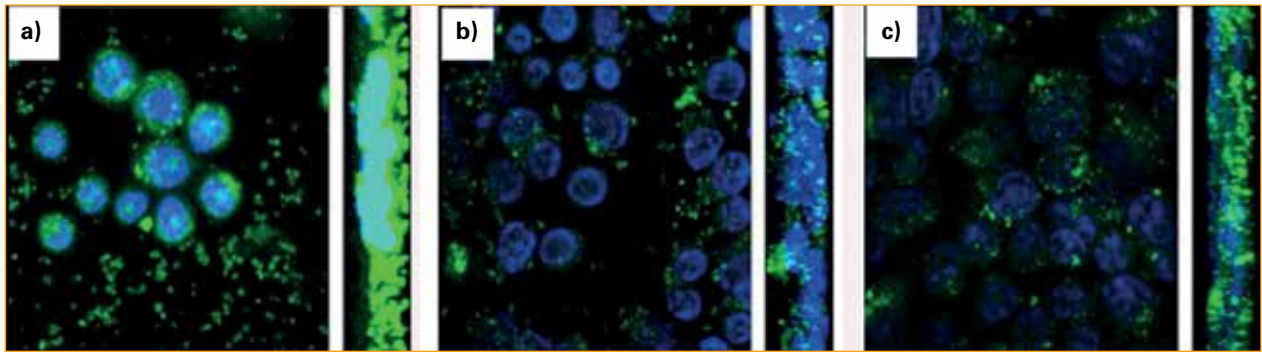


Figure 3. Imágenes de microscopía confocal que muestran la internalización de las nanopartículas a base de gadolinio (250 µg/mL) en células de cáncer cervicouterino (células HeLa, marcadas en color azul). La evaluación se realizó a diferentes tiempos de exposición: a) 6 h, b) 12 h y c) 24 h. Los puntos en color verde corresponden a las nanopartículas; las imágenes laterales son cortes sagitales que confirman la internalización.

Estas nanopartículas homogéneas en tamaños, formas y con pocos defectos, al utilizarse como agentes de contraste, biomarcadores o biosensores, han demostrado una mayor bioseguridad en ensayos *in vitro* e *in vivo* al aplicarse en células humanas y modelos animales. Los resultados han mostrado que estos sistemas de nanopartículas a base de gadolinio presentan muy baja toxicidad y excelente biocompatibilidad, además de ser capaces de internalizarse en células humanas sanas y cancerígenas (células HeLa) a concentraciones relativamente altas (250 µg/mL), como se muestra en la **Figura 3** (Hernández-Adame y cols., 2017). Igualmente, se ha observado que estas nanopartículas son capaces de inducir la activación de linfocitos y monocitos propios del sistema inmune. De manera que los resultados son muy prometedores, ya que abren la posibilidad de utilizar estas matrices como vehículos para transportar y liberar fármacos, o bien para la producción de nanovacunas.

■ ■ ■ **Nanovacunas a base de gadolinio**

El uso potencial de las nanopartículas a base de gadolinio para el desarrollo de nanovacunas se demostró recientemente. Para esto, nuestro grupo diseñó un novedoso prototipo de nanovacuna con el propósito de abordar la enfermedad producida por el virus del Zika (Ortega-Berlanga y cols., 2020). Recordemos que la enfermedad por Zika se transmite a través de la picadura de mosquitos del género *Aedes* y ha sido declarada por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como una emergencia internacional. En nues-

tro diseño, se utilizó una matriz de óxido de gadolinio dopada con los iones Tb^{3+} y Er^{3+} como vehículo para transportar péptidos antigénicos pertenecientes a la cápside viral (estructura proteica que rodea y protege el material genético de un virus). Los péptidos, que en este caso fueron una pequeña secuencia de aminoácidos pertenecientes a las proteínas que componen la cápside, fueron anclados a través de un proceso de funcionalización sobre la superficie de las nanopartículas. Este hecho permitió confinar una gran cantidad de péptidos en una sola nanopartícula, lo que trae múltiples beneficios en la formulación de nanovacunas; entre ellos, se muestra una mayor estabilidad química y térmica de los péptidos y la posibilidad de que el sistema inmune pueda detectarlos más fácilmente para iniciar la inmunoprotección. Para evaluar su eficacia, se utilizaron modelos animales de laboratorio (ratones BALB/c), comprobando que estos sistemas son capaces de inducir anticuerpos específicos contra el virus del Zika hasta por más de tres meses desde su primera aplicación. Una imagen representativa del proceso se muestra en la **Figura 4**.

Asimismo, es importante resaltar la importancia de haber dopado la matriz de gadolinio con los iones Tb^{3+} y Er^{3+} . Este hecho nos permite mantener las propiedades fotoluminiscentes de la matriz a través de procesos de CA; es decir, activando la matriz con luz IR para poder monitorear, en tiempo real, parámetros como la biodistribución, bioacumulación, degradación o eliminación de estos prototipos de nanovacunas en sistemas biológicos sin inducir efectos

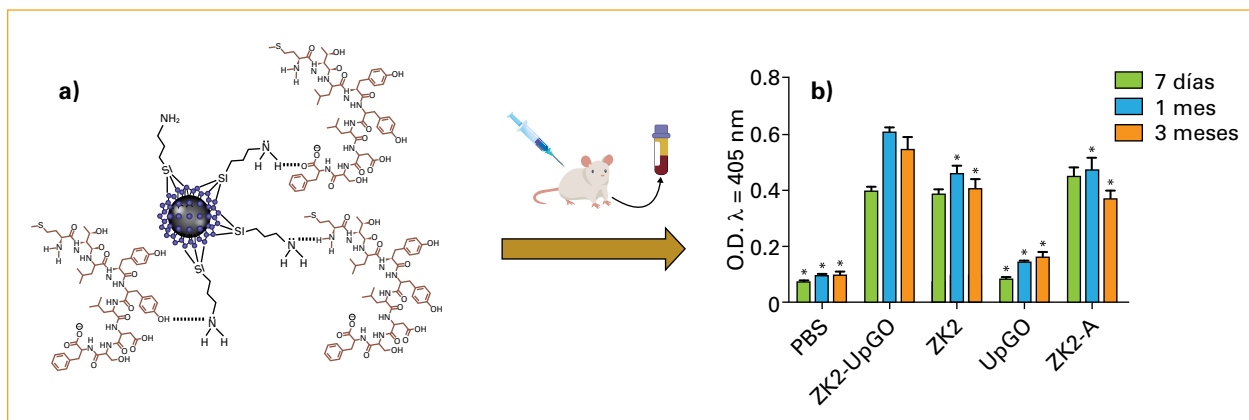


Figura 4. Diseño de la nanovacuna a base de gadolinio utilizada para generar anticuerpos contra el virus del Zika. a) Los péptidos anclados sobre la nanopartícula; b) generación de anticuerpos por el prototipo de nanovacuna llamado ZK2-UpGO.

negativos o daño a tejido sano por el uso de luz UV o radiación ionizante.

Conclusiones y perspectivas

Nos gustaría destacar no solamente la importancia que han tenido los lantánidos para el desarrollo tecnológico, sino también la gran contribución que están haciendo en el desarrollo de materiales para el campo biomédico, ambiental y biotecnológico. Asimismo, es importante mencionar las nuevas aplicaciones de los lantánidos en el sector agrícola, donde se vislumbran resultados muy prometedores en el campo de fertilizantes emergentes, inductores de resistencia y promotores de crecimiento, mostrando altos niveles de bioseguridad en la producción de alimentos, salud animal y humana.

Luis Hernández-Adame

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., Secihti.
ladame@cibnor.mx

Gabriela Palestino

Facultad de Ciencias Químicas y Centro de Investigación en Ciencias de la Salud y Biomedicina, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
palestinogabriela@uaslp.mx

Referencias específicas

- Hernández-Adame, L., A. Méndez-Blas, J. Ruiz-García, J. R. Vega-Acosta, F. J. Medellín-Rodríguez y G. Palestino (2014), "Synthesis, characterization, and photoluminescence properties of Gd:Tb oxysulfide colloidal particles", *Chemical Engineering Journal*, 258:136-145.
- Hernández-Adame, L., N. Cortez-Espinosa, D. P. Portales-Pérez, C. Castillo, W. Zhao, Z. N. Juárez, L. R. Hernández, H. Bach y G. Palestino (2017), "Toxicity evaluation of high-fluorescent rare-earth metal nanoparticles for bioimaging applications", *Journal of Biomedical Materials Research – Part B Applied Biomaterials*, 105(3):605-615.
- Larquet, C. y S. Carencio (2020), "Metal Oxysulfides: From bulk compounds to nanomaterials", *Frontiers in Chemistry*, 8:179.
- Ortega-Berlanga, B., L. Hernández-Adame, C. del Ángel-Olarte, F. Aguilar, S. Rosales-Mendoza y G. Palestino (2020), "Optical and biological evaluation of upconverting Gd₂O₃: Tb³⁺/Er³⁺ particles as microcarriers of a Zika virus antigenic peptide", *Chemical Engineering Journal*, 385:123414.
- Ortega-Berlanga, B., L. Betancourt-Mendiola, C. del Ángel-Olarte, L. Hernández-Adame, S. Rosales-Mendoza y G. Palestino (2021), "An overview of gadolinium-based oxide and oxysulfide particles: synthesis, properties, and biomedical applications", *Crystals*, 11(9):1094.

Bioetanol, biodiésel y biogás: definiciones, obtención y aplicaciones

El cambio climático, la seguridad energética y la disminución de combustibles fósiles ha propiciado el desarrollo de biocombustibles como los derivados de la biomasa por ser recursos renovables. Éstos pueden ser líquidos (bioetanol y biodiésel) y gaseosos (biometano y biohidrógeno), los cuales son usados en el transporte, producción de energía eléctrica y como materia prima.

Introducción

El uso excesivo de combustibles fósiles como el carbón, el gas natural y el petróleo para satisfacer las demandas energéticas de la sociedad ha traído consigo una emergencia climática a nivel mundial. A pesar de que se han firmado acuerdos internacionales, como el de París en 2015, con el fin de disminuir las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), los niveles de este gas –considerado como parte de los gases de efecto invernadero (GEI)– en la atmósfera no se han disminuido al ritmo deseado. La preocupación por los altos porcentajes de GEI radica en el efecto que tienen estos gases en la temperatura promedio de la Tierra y los efectos que el calentamiento global trae consigo.

El crecimiento de la población mundial y el estilo de vida de los países desarrollados han planteado desafíos a la sociedad actual: satisfacer la creciente demanda de energía y la reducción de GEI, así como incrementar la eficiencia energética. Una de las alternativas para hacer frente a estos desafíos es acrecentar el uso de energías renovables, las cuales pueden garantizar la seguridad energética, coadyuvar en la protección del medio ambiente y generar empleos. Diversos países desarrollados consideran a las energías renovables como el punto estratégico de una nueva generación de tecnología para alcanzar un desarrollo sustentable y sostenible.

La tendencia energética global es realizar una transición del sistema energético basado en fuentes fósiles a un sistema energético bajo en carbono y, finalmente, entrar en la era de la energía sostenible basada sobre todo en energías renovables. Una alternativa para dicha transición es el uso de la biomasa para la producción de biocombustibles (biodiésel, bioetanol y biogás).



■ **Energías renovables**

■ La transición energética necesaria para detener el cambio climático deberá basarse en el uso de energías renovables a escala global. La energía renovable es aquella que proviene de fuentes o procesos naturales que se renuevan constantemente. Ejemplo de estas energías son la energía solar y la energía del viento. Estos recursos renovables son “prácticamente inagotables”, pero no son constantes.

Las energías renovables a menudo son llamadas “energías limpias” o “energías verdes”, pero también tienen un impacto en el ambiente, aunque mucho menor que los combustibles fósiles. Las principales fuentes de energías renovables son: *a)* la energía solar, *b)* la energía hidroeléctrica, *c)* la energía eólica, *d)* la energía geotérmica, *e)* las energías del mar y *f)* la energía de la biomasa.

■ **Biomasa**

■ La biomasa “es una fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y animal), de la silvicultu-

tura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biológica degradable de los residuos industriales y municipales” (De Lucas y cols., 2012).

El éxito del uso de la energía basada en biomasa depende en gran medida de la disponibilidad de tierra cultivable. Se estima que para 2035 alrededor del 5 % de la tierra agrícola mundial será utilizada para cultivos dedicados a la producción de biocombustibles.

Los beneficios ambientales de utilizar la biomasa son múltiples, como la reducción del uso de combustibles fósiles, debido a que disminuye la cantidad de emisiones de carbono, mientras que se ralentiza el cambio climático, además de que la biomasa captura el dióxido de carbono de la atmósfera. Por otro lado, la biomasa es un agente limpiador de bajo costo cuando se aplica como bioacumulador o absorbente de diferentes contaminantes en el suelo, el agua y el aire.

■ **Biocombustibles**

■ El término “biocombustible” hace referencia a combustibles líquidos, sólidos y gases producidos



a partir de la conversión de la biomasa; por ejemplo, bioetanol producido a partir de caña de azúcar o maíz, y biogás generado por la descomposición anaerobia de desechos. Con base en la materia prima utilizada para su producción, los biocombustibles se clasifican en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación.

Los biocombustibles de primera generación son los más usados y se producen a partir de aceites comestibles como los de la colza, la soja, el girasol, el cártamo, la palma y el coco. Los biocombustibles de segunda generación son aquellos que se producen a partir de una variedad de materias primas diferentes, que van desde residuos agrícolas hasta desechos sólidos municipales. La mayoría de estos combustibles se encuentran en diversas etapas de experimentación y desarrollo. Los biocombustibles de tercera generación son los elaborados principalmente a partir de algas.

Bioetanol

En la producción de bioetanol se utilizan varios tipos de biomasa, los cuales se engloban en tres principales materias primas: a) el azúcar, b) el almidón y c) la biomasa lignocelulósica.

La biomasa celulósica, utilizada para la producción de bioetanol, se refiere a desperdicios de cultivo agrícola: hojas, desechos de madera y residuos de bosques, y desperdicios del procesamiento de pulpa/papel y cultivos energéticos. Algunos ejemplos de desperdicios agrícolas son la paja del trigo y el arroz, las hojas de maíz, los tallos y mazorcas, así como el bagazo de la caña de azúcar.

El contenido celulósico del maíz y la caña de azúcar oscila entre el 30 y el 70 %, y los principales productores de bioetanol en el mundo son Estados Unidos y Brasil. Su producción aún no ha comenzado a escala comercial, porque se requiere de una investigación intensa; además se necesitan grandes extensiones de tierra cultivable y un suministro de agua dulce para el riego.

Producción de bioetanol

Las rutas de conversión para la producción de bioetanol varían según la materia prima utilizada. En la

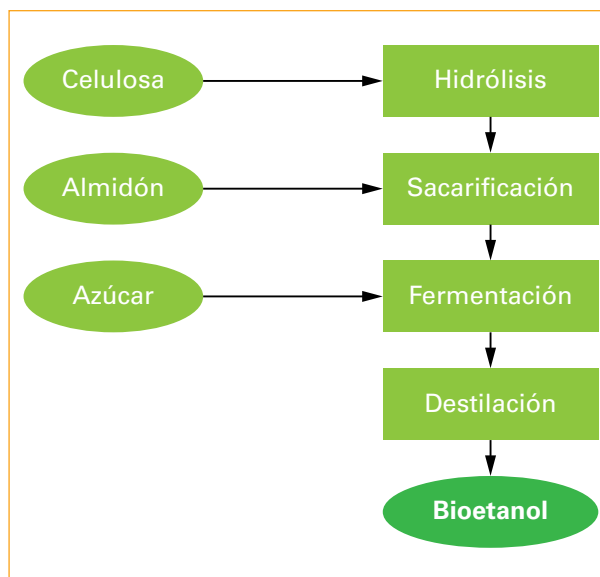


Figura 1. Diagrama del proceso de la producción de bioetanol.

Figura 1 se muestra un proceso simplificado para la producción de bioetanol a partir celulosa, almidón y azúcar.

El proceso de producción de etanol a partir de biomasa celulósica es el más complejo en comparación con los otros dos métodos, debido a que la celulosa no es fácil de procesar.

Biodiésel

Las materias primas que se utilizan para la producción de biodiésel son los aceites vegetales (como el aceite de soja) y las grasas de origen animal (como el sebo de res y los aceites reciclados provenientes de restaurantes). Su demanda se ha incrementado en las últimas décadas, por lo que se han desarrollado nuevos tipos de biomasa, tales como algas, camelina y jatropha (materias primas que mejoran el rendimiento). Además, se han implementado sistemas de “trampa de grasa” para recolectar grasas previamente a que ingresen a los sistemas de aguas residuales, con el fin de utilizarlas como materia prima.

Producción de biodiésel

La producción de biodiésel se lleva a cabo mediante tres principales métodos: craqueo térmico, microemulsión y transesterificación, y este último ha mostrado ser el método más adecuado (Figura 2).

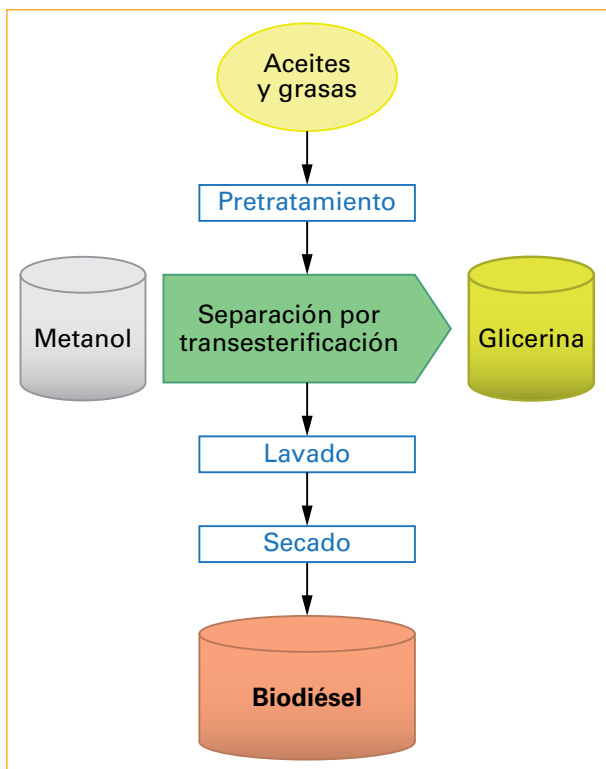


Figura 2. Proceso de producción de biodiésel mediante transesterificación.

La transesterificación (también llamada alcoholísis) consiste en una reacción química en la cual los triglicéridos presentes en las grasas o aceites reaccionan con alcoholes (generalmente metanol o etanol) para producir biodiésel y otros compuestos químicos que pueden ser usados en procesos industriales.

Las semillas son otra materia prima utilizada para la producción de biodiésel, y mundialmente se han

identificado más de 350 semillas que pueden utilizarse como materia prima, así como una gran variedad de hongos y microalgas. Entre los principales aceites comestibles para la producción de este combustible se encuentra el aceite de girasol, el aceite de palma, el aceite de colza y el aceite de soja. Por otro lado, también pueden usarse aceites no comestibles como el aceite de pongamia, el de mahua y el de jatropha.

Biogás

El biogás es un combustible producido a partir de biomasa y puede ser de tres tipos: biometano (CH_4), biohidrógeno (H_2) y biohitano (mezcla de CH_4 y H_2).

La conversión de la biomasa en biogás se lleva a cabo a través de procesos biológicos mediante la acción de microorganismos y tiene lugar en ausencia de oxígeno (digestión anaerobia), en ocasiones llamada biometanización. En este proceso la biomasa es degradada en compuestos más simples para producir biogás y compuestos líquidos (digestatos) usados en la producción de fertilizantes de alta calidad. Su producción se ha incrementado en países en desarrollo donde la gestión de estos desechos se ha convertido en un problema.

Producción de biogás

Para la producción de biogás se puede usar una gran variedad de residuos; entre ellos, residuos de cultivos agrícolas, residuos municipales, residuos sólidos urbanos orgánicos, lodos provenientes de plantas tratadoras de agua, excrementos de animales y residuos de

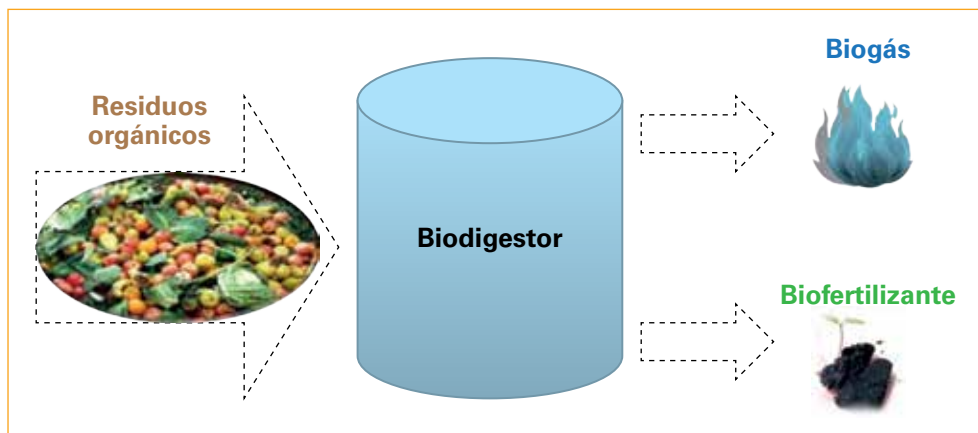


Figura 3. Proceso de producción de biogás.

la industria alimentaria (Figura 3). El proceso anaeróbico es llevado a cabo por microorganismos para producir diferentes gases: metano (del 40-65 %), dióxido de carbono (35-55 %), sulfuro de hidrógeno (0.1-3 %) y agua. Los porcentajes de cada uno de estos gases dependen de la composición de la biomasa usada, el pretratamiento de la materia prima, los microorganismos o enzimas utilizados, las condiciones de operación y el diseño del **biodigestor**.

Todos estos factores y la gran diversidad de biomasa que se puede utilizar originan una gran variedad de diseños de los biodigestores que son utilizados para su procesamiento; sin embargo, existe un proceso que no varía: la digestión anaerobia. Este proceso se compone de tres etapas:

- Acidogénesis: las bacterias descomponen moléculas de glucosa, ácidos grasos y aminoácidos en ácidos grasos volátiles y alcoholes.
- Acetogénesis: los ácidos grasos volátiles y los alcoholes se convierten en hidrógeno, dióxido de carbono (CO_2) y amoníaco.
- Metanogénesis: las arqueas (microorganismos unicelulares) convierten el hidrógeno y el ácido acético en metano y CO_2 .

En la actualidad, Europa lidera la producción mundial de biogás, debido a las políticas de apoyo a las energías renovables de la Unión Europea. La Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés) estima que en el año 2020 se produjeron 91 000 GWh de electricidad mediante biogás en el mundo, mientras que en México la cifra alcanzó 259 GWh en 2019.

■ Usos de los biocombustibles

■ Usos del bioetanol

El bioetanol puede usarse para la producción de bebidas alcohólicas, pero su principal uso es como combustible de motores de combustión interna. Este biocombustible puede mezclarse con gasolina en diferentes porcentajes; se estima que se pueden usar mezclas con 10 % de bioetanol en cualquier motor a gasolina. Además, el CO_2 generado durante la combustión del bioetanol se equilibra con el CO_2 “capturado” durante el cultivo de la biomasa usada en su producción, lo que coadyuva a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (hasta 12 %). El bioetanol también puede usarse como re-

◀ Biodigestor

Recipiente o tanque cerrado herméticamente cargado con residuos orgánicos, los cuales se descomponen en su interior para generar biogás.





activo sostenible para la producción de biodiésel en sustitución del metanol, puesto que es menos tóxico y se produce a partir de recursos renovables, lo que hace más sostenible la producción de este biocombustible y proporciona mayor independencia energética. Aunque en menor proporción, el bioetanol también se usa como materia prima en la industria química para la producción de detergentes y geles desinfectantes, así como para la producción de pinturas, tintas y resinas, entre otros.

Usos del biodiésel

El biodiésel se mezcla en diferentes porcentajes (2, 5 y 20 %) con diésel producido a base de petróleo para ser utilizado como combustible en motores de combustión interna, principalmente en la industria del transporte y para la producción de electricidad. De manera similar al bioetanol, el CO₂ liberado durante la combustión del biodiésel se compensa por el CO₂ adsorbido al cultivar la materia prima con que fue producido (soja, camelina, jatropha, etc.). El

uso de este biocombustible tiene diversas ventajas, como la de prolongar la vida útil del motor, mejorar la combustión debido a que tiene un mayor índice de cetano y se producen menos gases de efecto invernadero durante su combustión (hasta 41 % menos).

Usos del biogás

El biogás puede usarse como combustible para calderas, para motores de combustión interna para la producción de electricidad, como combustible en plantas de cogeneración (producción de calor y electricidad) y trigeneración (producción de calor, electricidad y refrigeración), y como combustible para vehículos a gas (biometano). Asimismo, se utiliza como sustituto de gas natural en procesos industriales, comerciales y domésticos.

Conclusiones

La energía es esencial para el desarrollo humano y el crecimiento económico. La demanda energéti-

ca ha registrado un incremento exponencial en las últimas décadas, debido al rápido crecimiento de la población mundial, al incremento de la calidad de vida (principalmente de países desarrollados) y al desarrollo tecnológico alcanzado en los últimos 50 años. Para satisfacer esta demanda de energía, el ser humano ha usado de manera excesiva combustibles fósiles como el gas natural, el petróleo y el carbón, lo cual ha traído consigo crisis energéticas, desequilibrio en los ecosistemas y un cambio climático global.

La producción de energía sostenible es un tema que ha cobrado gran relevancia por el calentamiento global registrado en los últimos años, que se ha convertido en un tema prioritario debido al cambio climático cada vez más evidente. Por lo anterior, las energías renovables tienen un papel determinante en la descarbonización del sector energético, pues son producto de recursos naturales y renovables. Entre las fuentes de energías renovables está la biomasa, a partir de la cual se pueden producir biocombustibles como el biodiésel, el bioetanol y el biogás (metano e hidrógeno). Estos combustibles representan una alternativa para disminuir el uso de combustibles fósiles y con ello reducir la concentración de gases de efecto invernadero y otros contaminantes.

Martín Quintero-Mayo

División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica del Valle de Toluca.

martin.quintero@upvt.edu.mx

Angélica Motejo-Pérez

División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica del Valle de Toluca.

angelicaperez@upvt.edu.mx

Juan García-Contreras

División de Ingeniería Industrial e Ingeniería en Energía, Universidad Politécnica del Valle de Toluca.

juangarcia@upvt.edu.mx

Lecturas recomendadas

De Lucas, A., C. del Peso, E. Rodríguez y P. Prieto (2012), *Biomasa, biocombustibles y sostenibilidad*, España, Instituto Tecnológico Agrario y Agroalimentario. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/260383181_Biomasa_biocombustibles_y_sostenibilidad, consultado el 13 de mayo de 2025.

González-Sánchez, M. E., S. Pérez-Fabiel, A. Wong-Villarreal, R. Bello-Mendoza y G. Yáñez-Ocampo (2015), "Residuos agroindustriales con potencial para la producción de metano mediante la digestión anaerobia", *Revista Argentina de Microbiología*, 47(3):229-235. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ram.2015.05.003>, consultado el 3 de mayo de 2025.

Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (2024), "Biodigestores: innovación sostenible para la agricultura y ganadería". Disponible en: <https://www.gob.mx/agricultura/es/articulos/biodigestores-innovacion-sostenible-para-la-agricultura-y-ganaderia?idiom=es>, consultado el 13 de mayo de 2025.

Sosa-Rodríguez, F. S. y J. Vázquez-Arenas (2021), "The biodiesel market in Mexico: challenges and perspectives to overcome in Latin-American countries", *Energy Conversion and Management*: X, 12:100149. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2021.100149>, consultado el 3 de mayo de 2025.

Zamora-Hernández, T., A. Prado-Fuentes, J. Capataz-Tafur, B. E. Barrera-Figueroa y J. M. Peña-Castro (2014), "Demostraciones prácticas de los retos y oportunidades de la producción de bioetanol de primera y segunda generación a partir de cultivos tropicales", *Educación Química* [en línea], 25(2): 122-127. Disponible en: [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(14\)70534-8](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(14)70534-8), consultado el 3 de mayo de 2025.

Estefanía Abigail de la Mora-Núñez, Rodrigo Díaz-Díaz y Héctor Paul Reyes Pool

Nanotecnología hasta en las verduras

El alto uso de plaguicidas en México ha causado la presencia de un exceso de residuos peligrosos en productos agrícolas, por lo que el desarrollo de nuevas estrategias sencillas y más eficaces para la detección de estos agroquímicos hoy en día es una necesidad. El presente artículo aborda el uso, ventajas y obstáculos de las nanoenzimas como potenciales candidatos para la detección rápida y sencilla de plaguicidas peligrosos en México.

Plaguicidas en México y la importancia de su detección

Con el objetivo de cubrir las necesidades alimentarias en México y evitar pérdidas en la producción de cultivos debido a enfermedades y plagas, el uso de plaguicidas ha sido una constante estrategia en el sector agroalimentario. Y aunque estos compuestos químicos tienen una eficiencia elevada en la protección de cultivos, tienen efectos negativos en cuanto a contaminación del medio ambiente, efectos tóxicos en cultivos tratados y no tratados, así como en fauna importante para el ecosistema (véase la [Figura 1](#)).

Por otra parte, la presencia de residuos de plaguicidas altamente tóxicos en productos agrícolas es considerada como uno de los factores detonantes de diversas **enfermedades crónico-degenerativas** en la población mexicana, como cáncer, enfermedades cardiovasculares, diabetes, entre otras. A pesar de contar con regulaciones y normativas oficiales y voluntarias en el país, el uso de estos agroquímicos por parte de los productores ha carecido de protocolos de utilización eficientes. Una de las limitaciones para saber si un plaguicida ha sido o está siendo usado es no contar con métodos y técnicas viables para el monitoreo y cuantificación de estos compuestos y sus residuos en los cultivos y el medio ambiente.

Muchos procedimientos para la identificación y cuantificación de plaguicidas peligrosos y sus residuos se basan en métodos altamente especializados, como la cromatografía líquida de alto desempeño (HPLC, por sus siglas en inglés) o la cromatografía de gases (CG), los cuales necesitan equipos, reactivos y personal altamente especializado para llevarse a cabo, lo que encarece el análisis a realizar.

Enfermedades crónico-degenerativas

Padecimientos que deterioran la salud de las personas de forma gradual y a largo plazo, afectando órganos y tejidos. Este tipo de enfermedades pueden ser congénitas o hereditarias.





Figura 1. Efectos negativos causados por plaguicidas y sus residuos en los seres vivos y el ecosistema.

Asimismo, la necesidad de transportar las muestras tomadas hasta el laboratorio para su análisis es un factor crucial que puede interferir en la identificación y cuantificación eficaces de estos compuestos. Por lo tanto, existe la necesidad de crear nuevas estrategias para la rápida y adecuada identificación de estos compuestos, así como de que tengan un precio accesible para los productores.

Ante este hecho, la **nanotecnología** ha surgido como una herramienta altamente eficiente para identificar y cuantificar compuestos peligrosos para los seres vivos y el medio ambiente de manera rápida, sencilla, barata y reproducible. Específicamente, las nanoenzimas han despertado un gran interés por su desarrollo y aplicación en el área de detección (como sensores ópticos, sensores electrónicos, sensores electroquímicos, entre otros), debido a su fácil desarrollo, su alta estabilidad durante el almacenamiento y el trabajo, la respuesta a estímulos externos, así como por su gran capacidad de trabajar de manera estable y eficiente en condiciones de ambientes biológicos.

Nanotecnología

Rama de la ciencia y la ingeniería que se enfoca en el diseño, la creación y la aplicación de materiales, dispositivos y sistemas a una escala nanométrica; es decir, de aproximadamente 1 a 100 nanómetros (10^{-9} metros). Esta disciplina permite manipular la materia a nivel atómico y molecular para obtener propiedades y funciones innovadoras en diversos campos.

Las nanoenzimas son un tipo de enzimas artificiales que imitan las funciones catalíticas de las enzimas naturales; es decir, pueden mediar reacciones de creación o de degradación de moléculas y biomoléculas en un ambiente biológico, lo cual lleva a pensar que las proteínas y algunos nanomateriales tienen similitudes. Las características de las nanoenzimas que hacen interesante su desarrollo y aplicación en este campo son la facilidad y el bajo costo de su producción, el que puedan modularse su tamaño y superficie, su dosificación en uso y el hecho de que pueden producirse a gran escala. Dentro de las aplicaciones más destacadas de las nanoenzimas se encuentran la captura del dióxido de carbono emitido en procesos industriales, el ataque y destrucción de células tumorales y la identificación de biomoléculas relacionadas con enfermedades o contaminación ambiental. Por lo tanto, las áreas de aplicación de las nanoenzimas serían la industria de alimentos, la agricultura y la medicina, entre otras (véase la **Figura 2**).

Mecanismos de detección de plaguicidas mediante el uso de nanoenzimas

La detección de los plaguicidas y sus residuos se mejora con la presencia de una molécula en la superficie de las nanoenzimas (como anticuerpos, proteínas, compuestos químicos, entre otros) que ayuda a optimizar la identificación de estos compuestos de una manera específica. Los mecanismos de acción de las nanoenzimas implican la interacción con los plaguicidas/residuos y la modificación (incremento o bloqueo) de los diferentes tipos de reacciones que pueden generar, así como la cantidad de otros compuestos que pueden producir, o simplemente la generación de reacciones de degradación (hidrólisis) sobre los plaguicidas/residuos. Los mecanismos de identificación siempre estarán asistidos por métodos y equipos con la capacidad de detectar alguna señal provocada por la interacción entre las nanoenzimas con estos compuestos químicos, con lo que se corrobora la ausencia, presencia o cantidad de los pesticidas detectados (véase la **Figura 3**).

Muchos de estos ensayos operan detectando señales con base en colorimetría (ausencia o presencia

de color), cambios de voltaje (V), corriente (μA), y la magnitud de dicha señal estará directamente relacionada con la concentración del plaguicida. Es importante señalar que los métodos colorimétricos suelen ser ensayos cualitativos; es decir, el cambio de color indica la presencia o ausencia de un plaguicida o sus residuos. Sin embargo, al acoplar estas plataformas con ciertos instrumentos, como la espectroscopía ultravioleta-visible, estos ensayos de detección de plaguicidas adquieren un carácter semicuantitativo, por lo que es posible detectar la cantidad de plaguicida/residuo en una muestra. Estos métodos, sin embargo, deben corroborarse con metodologías ya establecidas, por lo que su utilización como una estrategia altamente eficaz sigue en proceso de regulación.

Estudios de identificación de plaguicidas

Luo y sus colaboradores desarrollaron en 2022 un ensayo colorimétrico a base de nanoenzimas para la detección de algunos plaguicidas organofosforados, en específico, el metilparatión y el clorpirifós. Ambos plaguicidas son muy utilizados para controlar plagas en cultivos y ganado, pero se ha demostrado que tienen muchos efectos dañinos para la salud humana



Figura 2. Áreas de aplicación de las nanoenzimas.

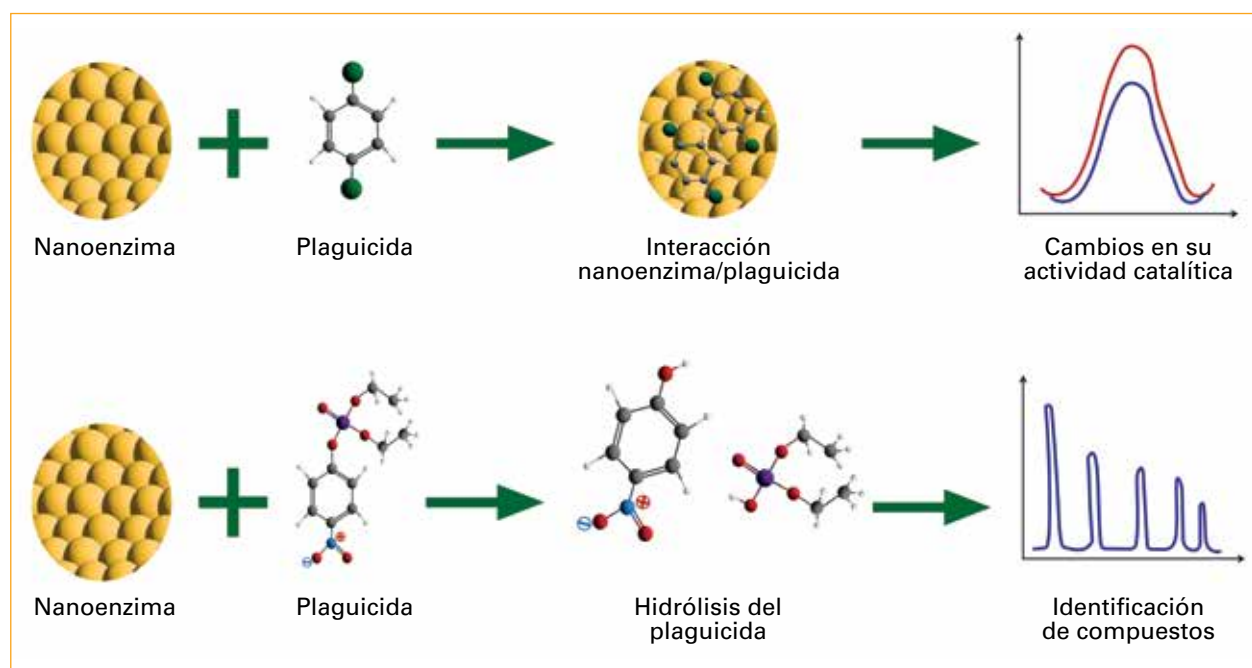


Figura 3. Mecanismos de acción de ensayos para la detección de plaguicidas basados en nanoenzimas.

y el medio ambiente. Los autores referidos crearon un sistema bimetalico basado en hierro (Fe) y manganeso (Mn), metales que demostraron tener una excelente propiedad oxidativa de diversas moléculas orgánicas. El método utiliza un compuesto que, al oxidarse, genera una coloración azul intensa, el 3,3',5,5'-tetrametilbencidina (TMB), una enzima propia del sistema nervioso, la acetilcolinesterasa. Al agregar en una reacción la nanoenzima, la muestra de plaguicidas y el TMB, los resultados mostraban la capacidad de la nanoenzima de acoplarse a los plaguicidas e incrementar la reacción de oxidación del TMB, generando soluciones coloridas azules. Por otro lado, cuando a la reacción se agregaba la enzima acetilcolinesterasa, la cual compite con los plaguicidas por acoplarse con la nanoenzima, se provocaba una reducción en la oxidación del compuesto TMB. De esta manera, los autores demostraron que habían creado un método eficaz para la detección de algunos plaguicidas organofosforados.

Por otro lado, Ge y colaboradores (2022) desarrollaron una plataforma similar para detectar malatión, un insecticida muy utilizado en la agricultura para el control de plagas como pulgas y piojos. Este compuesto es altamente tóxico y puede ser mortal, por lo que su monitoreo resulta crucial para mantener a raya los efectos negativos sobre seres vivos y medio ambiente. El sistema se basa en crear nanoenzimas a base de Fe, zinc (Zn) y carbono (C), que tienen la capacidad de incrementar la oxidación del compuesto TMB y generar así una solución colorida azul. Para corroborar interferencias en el método, los autores agregaron L-ácido ascórbico 2-fosfato (AA2P), el cual entra en contacto con la nanoenzima, adhiriéndose a su superficie y bloqueando su capacidad de oxidar TMB, con lo cual la generación de una tonalidad azul se veía disminuida.

Ahora bien, cuando la muestra contenía malatión, éste interactuaba rápidamente con el AA2P, degradándolo y dejando libre a la nanoenzima para catalizar la oxidación del TMB, con lo que se volvía a observar una coloración azul intensa. Lo interesante de este trabajo es que los autores lograron crear un *software* o aplicación que se instala en equipos celulares para leer y analizar la intensidad de la co-

loración formada, para así tener una idea de la posible cantidad de malatión en una muestra. Para esto, los autores tomaban unas gotas de las soluciones de reacción, las colocaban en un papel y finalmente las analizaban con un dispositivo celular, facilitando así la comprensión de los resultados del sensor colorimétrico para el usuario. De esta manera, había sido creado un sistema de detección y monitoreo en tiempo real y transportable.

Otra estrategia de detección de plaguicidas peligrosos mediante nanoenzimas es la integración con ensayos electroquímicos. La electroquímica es una rama de la química que se centra en estudiar la relación existente entre reacciones químicas y electricidad. Es decir, cuando en un sistema se provoca una perturbación eléctrica, esto genera que diversas moléculas se carguen, se muevan y se produzcan reacciones químicas (de tipo óxido-reducción), las cuales son detectadas en la superficie de un electrodo y, dependiendo de la cantidad de reacción química generada, la corriente eléctrica se verá modulada. Un ejemplo de ensayo electroquímico que incorpora nanoenzimas es el desarrollado por Qui y colaboradores (2019), que utiliza nanopartículas de dióxido de titanio, con aminoácidos (serina, histamina y ácido glutámico) anclados a su superficie, como nanoenzima. Las nanopartículas y los aminoácidos trabajan en conjunto para catalizar la descomposición (hidrólisis) de pesticidas organofosforados en p-nitrofenol, un compuesto aromático de características electroactivas, por lo que su identificación mediante métodos electroquímicos era muy viable. En este caso, los autores reportaron que un aumento en la corriente del electrodo indica la presencia de los agroquímicos fosforados, como resultado de la reacción de hidrólisis catalizada por la nanoenzima (véase la [Figura 4](#)).

Otro gran desarrollo para la detección de plaguicidas organofosforados, como el malatión, es el creado por Arsawiset y colaboradores recientemente (2023). Este sensor se basa en una membrana (papel) que tiene embebidas nanoenzimas a base de óxidos de cobre, en conjunto con nanopartículas de óxido de silicio (las cuales potencian la sensibilidad del método). El método se basa en colocar

en la membrana una cantidad estandarizada de acetilcolina, la cual, al interactuar con el malatión, genera el rompimiento del compuesto en colina, y ésta, en presencia de dióxido de hidrógeno (o agua oxigenada, H_2O_2), tiene la capacidad de catalizar la oxidación de o-dianisidina, un compuesto químico que al oxidarse genera un compuesto colorido de color café. Así, los plaguicidas presentes como el malatión podrán ser identificados por la generación de una mancha de color café en el papel de prueba. Por otro lado, la intensidad de la mancha café está relacionada directamente con la cantidad de plaguicida presente en la muestra. De esta manera, estos autores crean un sistema de detección muy sencillo, de muy bajo costo y transportable, por lo que podría ser una buena alternativa para el monitoreo en tiempo real de este tipo de compuestos químicos dañinos.

Ventajas y retos del uso de nanoenzimas para detectar plaguicidas

Los ensayos nanoenzimáticos tienen ciertas ventajas sobre los métodos convencionales para la detección de plaguicidas y han demostrado tener resultados consistentes con los obtenidos por métodos tradicionales, pero en un menor tiempo de detección. Mientras que con métodos convencionales se obtienen resultados después de 3 horas, con pruebas nanoenzimáticas sólo se requiere un tiempo promedio de 10 minutos (Ge y cols., 2022; Qui y cols., 2019). Asimismo, las nanoenzimas son capaces de detectar concentraciones de agroquímicos hasta 10 veces menores en comparación con los métodos convencionales (Qiu y cols., 2019; Ge y cols., 2022). Además, los resultados obtenidos por estos sensores son reproducibles, ya que no ocurren cambios en su actividad catalítica durante su almacenamiento (Luo y cols., 2022; Ge y cols., 2022).

Otra ventaja de los ensayos integrados con nanoenzimas es el desarrollo de sensores transportables. Esto permite que la detección se pueda realizar en el mismo lugar donde se encuentran los cultivos, con lo cual se evitan problemas de degradación o contaminación de muestras y se reducen los gastos asociados al transporte de muestras y el costo de los

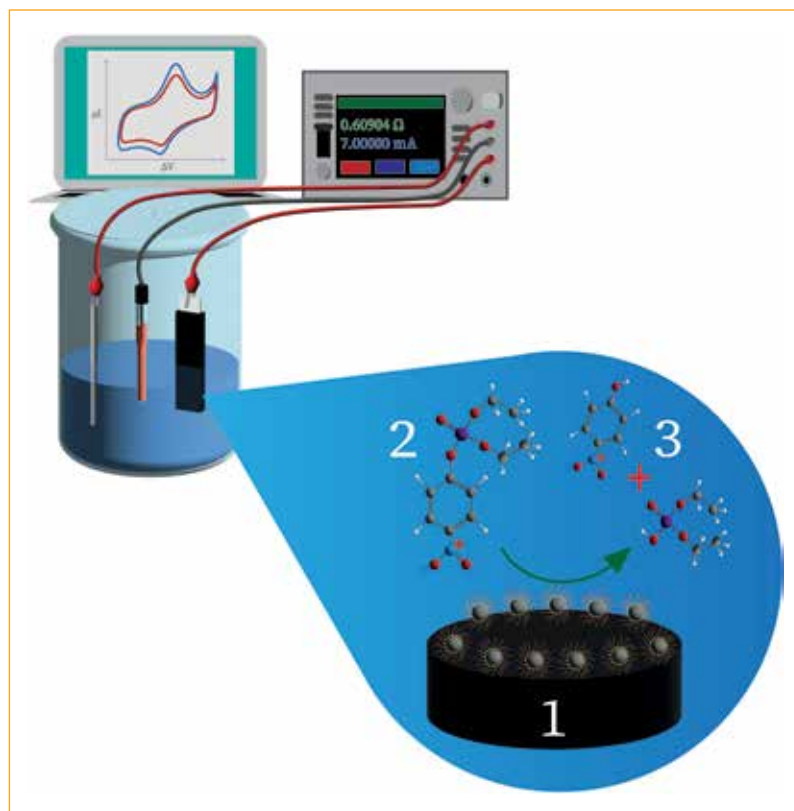


Figura 4. Representación gráfica del análisis de compuestos mediante métodos electroquímicos: reacción en la superficie de un material conductor (1) con un analito (2) y su conversión a otros compuestos mediante reacción química (3). La conversión genera una señal eléctrica que es detectada por el sistema de electrodos conectados a un potenciostato.

estudios de detección. Por otra parte, considerando que los usuarios de estas pruebas puedan ser capaces de interpretar los resultados de una manera sencilla, los ensayos nanoenzimáticos se convierten en una alternativa accesible y fácil de interpretar para los agricultores, de modo que ellos mismos puedan detectar plaguicidas en sus cultivos.

Aunque los ensayos nanoenzimáticos representan una alternativa a los métodos tradicionales, existen varios retos que resolver para que puedan estar al alcance de los agricultores. El hecho de que la cuantificación de plaguicidas de varios de los sensores nanoenzimáticos descritos previamente sea indirecta resulta una desventaja. ¿Quién garantiza que la acetilcolinaesterasa sea verdaderamente inhibida por algún tipo de plaguicidas? Si existen otras sustancias presentes en la muestra capaces de inhibir a esta enzima, entonces los resultados de las pruebas no reflejarían únicamente la concentración

de plaguicidas presentes en la muestra; por lo que se ha de buscar que las nanoenzimas sean incorporadas mediante métodos de detección directa de agroquímicos peligrosos.

Además de la interferencia que pueden generar otras sustancias presentes en la muestra, las mismas nanoenzimas pueden influir en los resultados de la detección. Esto ocurre principalmente en pruebas colorimétricas debido a la coloración que poseen estos nanomateriales, interferencia que no ocurre en sensores electroquímicos. Si bien en las muestras reales existen biomoléculas –como la vitamina C– que pueden participar en reacciones electroquímicas e interferir en la cuantificación, éstas se pueden eliminar de la muestra mediante un pretratamiento térmico (Wu y cols., 2021). Esta capacidad de disminuir la interferencia, así como la posibilidad de desarrollar métodos de detección directa de plaguicidas, hace que los ensayos electroquímicos integrados con nanoenzimas tengan mayor confiabilidad y reproducibilidad que los colorimétricos.

Todos los sensores descritos anteriormente tienen la capacidad de detectar al menos dos plaguicidas diferentes. Esto puede volverse una desventaja cuando se busca detectar un agroquímico en particular, ya que los otros plaguicidas presentes en la muestra generarían interferencia en la medición. Por consiguiente, el resultado obtenido por estos métodos de

detección no serviría para determinar la cantidad de un determinado plaguicida en la muestra. Aunque este problema se puede resolver con la adhesión de moléculas que tengan alta afinidad con un determinado agroquímico en la superficie de la nanoenzima, esto podría impactar tanto positiva como negativamente en su actividad catalítica (Singh, 2019). Por lo tanto, se tienen que buscar otras alternativas para incrementar la especificidad de las nanoenzimas.

■ Conclusiones y perspectivas

■ Los ensayos nanoenzimáticos podrían representar una alternativa para el monitoreo de compuestos peligrosos en el sector agrícola mexicano, por las ventajas tecnológicas y económicas que poseen. Los ensayos colorimétricos y electroquímicos que utilizan nanoenzimas se caracterizan por su sensibilidad, selectividad y capacidad de detectar, directa o indirectamente, concentraciones muy bajas de plaguicidas presentes en muestras provenientes de cultivos agrícolas. Además, su facilidad de transporte y manejo hace que la detección de compuestos sea más rápida –evita traslados y posible degradación de muestras al llevarlas al laboratorio– y que no requiera personal especializado. Las propiedades catalíticas de las nanoenzimas representan una herramienta novedosa y de gran potencial para usarse solas o incorporarse a alguna metodología actual con el principal objetivo de mejorar la detección y monitoreo de compuestos agroquímicos peligrosos. Asimismo, estos nanomateriales abren la posibilidad para que, en un futuro cercano, se desarrollen sensores que puedan identificar problemáticas en los cultivos, como plagas, enfermedades y contaminaciones ocasionadas por otros compuestos peligrosos.

Por último, es importante mencionar que en México no existe una regulación específica para su aplicación en la agricultura; aunque sí existen propuestas de expertos en el área en las que se indican los efectos de toxicidad y riesgo de diferentes nanomateriales dependiendo de su composición, tamaño, forma, dosis implementada y tipo de uso. Sin embargo, estos estudios se han basado en nanomateriales



y productos nanoformulados creados para mejorar diversas características de las cosechas, para mejorar la calidad del suelo, aumentar la productividad de los cultivos, crear productos agrícolas con un valor agregado o mejorar la calidad en general, así como con el fin de controlar plagas y enfermedades. En este aspecto, como los nanomateriales tendrán contacto con plantas, suelo y agua, pueden desencadenar efectos negativos a corto y mediano plazo en la fauna y la flora, lo que hace que su regulación y permisos de uso sean más severos.

En el caso de las nanoenzimas, como son acopladas a métodos que no tienen contacto directo con los cultivos, el suelo, el agua y la fauna, su efecto negativo se vería drásticamente disminuido. Por último, la regulación sobre el desarrollo, aplicación y eliminación de estos nuevos métodos estaría a cargo de la NOM-008-SSA1-1993, la cual establece las normativas específicas para los métodos usados para detectar sustancias tóxicas y plomo.

Los autores agradecen todo el apoyo del doctor Aldo Amaro Reyes (Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro) en la revisión del manuscrito.

Estefanía Abigail de la Mora Núñez

Departamento de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Querétaro.
estefania.delam@gmail.com

Rodrigo Díaz-Díaz

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
rdiaz31@alumnos.uaq.mx

Héctor Paul Reyes Pool (Héctor Pool)

Departamento de Investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería,
Universidad Autónoma de Querétaro.
hector.reyes@uaq.mx

Referencias específicas

- Arsawiset, S., S. Sansenya y S. Teepoo (2023), "Nanozymes paper-based analytical device for the detection of organophosphate pesticides in fruits and vegetables", *Analytica Chimica Acta*, 1267:341377.
- Ge, J., L. Yang, Z. Li, Y. Wan, D. Mao *et al.* (2022), "A colorimetric smartphone-based platform for pesticides detection using Fe-N/C single-atom nanozyme as oxidase mimetics", *Journal of Hazardous Materials*, 436:129199.
- Luo, L., Y. Ou, Y. Yang, G. Liu, Q. Liang *et al.* (2022), "Rational construction of a robust metal-organic framework nanozyme with dual-metal active sites for colorimetric detection of organophosphorus pesticides", *Journal of Hazardous Materials*, 423:127253.
- Qiu, L., P. Lv, C. Zhao, X. Feng, G. Fang *et al.* (2019), "Electrochemical detection of organophosphorus pesticides based on amino acids conjugated nanozyme modified electrodes", *Sensors and Actuators B: Chemical*, 286:386-393.
- Singh, S. (2019), "Nanomaterials exhibiting enzyme-like properties (Nanozymes): Current advances and future perspectives", *Frontiers in Chemistry*, 7(46).
- Wu, J., Q. Yang, Q. Li, H. Li y F. Li (2021), "Two-dimensional MnO₂ nanozyme-mediated homogeneous electrochemical detection of organophosphate pesticides without the interference of H₂O₂ and color", *Analytical Chemistry*, 93(8):4084-4091.

Victoria Conde-Avila y Carmen Martínez-Valenzuela

Los contaminantes orgánicos persistentes en México

Los contaminantes orgánicos persistentes son compuestos muy dañinos a los que estamos expuestos sin darnos cuenta. Estas sustancias están asociadas a graves problemas de salud, como el cáncer, problemas neuronales, de fertilidad y diabetes. En este artículo te invitamos a conocer qué son y la situación actual de México en este respecto.

¿Qué son los cop?

Los contaminantes orgánicos persistentes (cop) son compuestos extremadamente peligrosos que permanecen en el ambiente por largo tiempo. Su capacidad de causar daño se relaciona con su forma química, pues al ser sustancias orgánicas, son muy parecidas a moléculas que encontramos en la naturaleza y en el cuerpo humano, por lo que pueden ingresar, interactuar o modificar químicamente procesos biológicos naturales. Por ejemplo, pueden alterar el funcionamiento de las células, hacerse pasar por hormonas o afectar el genoma. Tienen, además, la capacidad de viajar por el aire, el agua o acumularse en el suelo, así como en la grasa de los animales y los seres humanos. Con base en esta definición, existen diferentes sustancias de diversos grupos químicos que han sido consideradas como cop. Originalmente, 12 contaminantes –denominados “la docena sucia”– fueron seleccionados como los de mayor peligro con base en investigaciones realizadas a nivel mundial. Dichos compuestos son algunos plaguicidas de uso agrícola, productos químicos industriales que encontramos en telas y utensilios de uso común, así como productos generados involuntariamente por reacciones químicas, la mala gestión de los basureros y la quema de material vegetal o chatarra electrónica.

Desde hace años existe evidencia innumerable y un gran consenso sobre los riesgos que representa la contaminación por cop para todos los seres vivos (UNEP, 2021). La mayoría de los cop pertenecen al grupo de sustancias cloradas (**organo-clorados**), muchas de las cuales son liberadas al ambiente con la finalidad de que actúen como plaguicidas. Sin embargo, por el mismo principio que usan, dañan no sólo a la plaga, sino que provocan afectaciones a todos los organismos en diferente nivel y proporción. Entre los principales efectos en los seres humanos se

Compuestos organoclorados

Sustancias orgánicas que contienen átomos de cloro en lugar de algunos átomos de hidrógeno. Se caracterizan por su elevada toxicidad, persistencia en el medio ambiente y su capacidad para bioacumularse en la cadena alimentaria y generar cáncer.



encuentran: intoxicación, envenenamiento, bloqueo de enzimas, afectación hormonal, pérdida de la fertilidad, alteraciones en la transmisión de estímulos cerebrales, déficit de atención, formación de tumores, cáncer y muerte (UNEP, 2021).

■ **Acciones para disminuir o evitar el uso de COP**

■ Una manera de disminuir el daño de los COP ha sido frenar su generación y liberación al ambiente, así como monitorear las concentraciones actuales de dichas sustancias para verificar que se cumpla con las restricciones de su uso. Para ello se firmó el Convenio de Estocolmo (CE), tratado internacional que inició en 2001 y en el que algunos países se comprometen a vigilar, eliminar o reducir la producción y el uso de COP en beneficio del planeta (UNEP, 2021). Actualmente, el convenio ha ampliado la lista de COP a 30 sustancias y sus derivados, tanto plaguicidas como otros grupos químicos de alto riesgo y de

vigilancia obligada, mientras otras sustancias se encuentran en evaluación para ser incluidas en próximas reuniones e implementar así nuevas medidas de restricción.

México fue el primer país latinoamericano en firmar el CE desde el año 2000 y lo ratificó en 2004. Desde entonces, a nivel nacional se han implementado algunas acciones para frenar la producción y disminuir el uso de COP (Semarnat, 2016 y 2022). En cuanto a plaguicidas específicamente, en México se han impuesto restricciones y prohibiciones a COP como el clordano, heptacloro, drinas, lindano, hexa- y pentaclorobenceno, el DDT y el endosulfán. Sin embargo, luego de más de 20 años de la firma del convenio, los programas de monitoreo de contaminantes dependientes de los institutos gubernamentales y de los programas nacionales de gestión no suelen contemplar el monitoreo activo de COP para corroborar que estas sustancias no estén siendo liberadas al ambiente o se encuentren en concen-



traciones elevadas. Pese a que México tiene leyes de protección ecológica y un Plan Nacional de implementación de monitoreo de COP (Semarnat, 2016 y 2022), este último no se ha actualizado y aún no se han generado normas ambientales legalmente exigibles para cada uno de los contaminantes y otros plaguicidas dañinos considerados en el CE. A la fecha, no existe un programa nacional de monitoreo vigente o investigación integral para los COP, ni de otros plaguicidas a nivel nacional, por lo que la información sobre el grado de exposición a estas sustancias suele ser escasa y poco difundida.

■ Monitoreo de COP en México

■ Las investigaciones sobre monitoreos o evidencia de daños ambientales y a la salud asociados a los COP y a otros plaguicidas en México suelen llevarlas a cabo grupos de investigación nacionales o realizarse a través de proyectos financiados de forma pública o privada. Estas evaluaciones requieren una sustancial inversión para su implementación en infraestructura, equipo y materiales. No obstante, como parte de su compromiso con el convenio, México ha participado en campañas globales de monitoreo del Plan de Vigilancia Mundial (PVM) de COP organizadas por el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y financiadas por el Fondo Global para el Medio Ambiente (GEF, por sus siglas en inglés) (UNEP, 2021). Estas campañas están diseñadas para apoyar a los países en las evaluaciones y verificar los resultados de la aplicación del convenio en todo el mundo.

La más reciente campaña de monitoreo de COP en México se llevó a cabo en el norte del país, particularmente en el estado de Sinaloa (Martínez-Valenzuela y cols., 2022a y 2022b). Los resultados publicados sobre el PVM en México evidenciaron la exposición a múltiples COP prohibidos. Del total de sustancias evaluadas de forma obligada por el convenio, más del 85 % fueron detectadas en el aire y leche materna de las muestras nacionales, principalmente por plaguicidas organoclorados. Entre los plaguicidas, se encontraron concentraciones alarmantes de DDT y sus derivados, así como de endosulfán y hexacloro-



benceno. De acuerdo con el reporte para América Latina, esta región es la que presentó las mayores concentraciones de plaguicidas en comparación con el resto del mundo, y México fue el país con la mayor concentración de DDT y otros compuestos clorados. Dado que estas sustancias se encuentran prohibidas desde hace años, la presencia y concentración en las que se encontraron es inadmisible y supone un uso ilegal en la región, además de una deficiente vigilancia.

La producción de plaguicidas organoclorados en México inició en 1950, y en 1959 nuestro país se convirtió en el principal productor de DDT en América Latina. El DDT se añadió al CE como parte de las 12 sustancias iniciales; sin embargo, México fue uno de los últimos países en detener su producción (en 2004). Por otro lado, el endosulfán fue incluido en el convenio en 2011 y prohibido en México hasta 2017. Y si bien actualmente los plaguicidas detectados en el último monitoreo están prohibidos, el DDT –también prohibido para uso agrícola– aún conserva la excepción de uso para el control de vectores de enfermedades.



Adicionalmente, a pesar de que, de acuerdo con lo estipulado en el convenio, existe la obligación de notificar a la Secretaría de la Organización Mundial de la Salud (OMS) sobre la producción, uso o la intención de utilizar DDT, al analizar los resultados en cuanto a su detección en México, se encontró en concentraciones extremadamente elevadas, lo cual puede deberse también a la aplicación de formulaciones técnicas no declaradas y a fuentes secundarias; es decir, al uso de productos similares o como aditivos no especificados en las formulaciones de productos. En otras zonas, estas altas concentraciones se han relacionado con la aplicación de dicofol, otro plaguicida que genera problemas similares debido a que produce los mismos compuestos que el DDT durante su descomposición (Martínez-Valenzuela y cols., 2022b).

En cuanto a la temporalidad, las fechas de monitoreo para la detección de COP coinciden con los tiempos de labor agrícola (verano y otoño), estaciones en las que se presentó una mayor concentración de compuestos clorados, por lo que las aplicaciones

directas, además de los cambios de temperatura en esas fechas, indicarían un mayor riesgo de exposición.

Lamentablemente, los resultados elevados de presencia de plaguicidas en México no resultan sorprendentes, pues la zona norte de la República es una región reconocida por su actividad agrícola intensiva y donde suelen aplicarse enormes cantidades de plaguicidas sin ninguna restricción, tanto por vía terrestre como aérea, a pocos kilómetros de las poblaciones (Martínez-Valenzuela y cols., 2017 y 2019). En consecuencia, la exposición humana a COP, y a otros plaguicidas no incluidos en la lista, es evidente y representa riesgos tanto para productores como para la población en general en todo el país, no sólo a través de actividades agrícolas, sino de la alimentación y exposición por inhalación del aire contaminado.

En el norte del país se han hecho esfuerzos por evidenciar el peligro que representa la fuerte exposición a estas sustancias. En un estudio previo de la región se demostró que los pilotos que manipulaban plaguicidas y los esparcían con avionetas en campos

de cultivo presentaban daño en el genoma y mayor riesgo de cáncer en comparación con la población general (Martínez-Valenzuela y cols., 2017 y 2019). Al respecto, en un esfuerzo por alertar y disminuir las condiciones de exposición, la Comisión Nacional de los Derechos Humanos emitió el 26 de diciembre del 2018 la recomendación número 82/2018, después de haber examinado las evidencias del expediente CNDH/6/2017/5373/Q, relacionado con los escritos que presentó la sociedad civil, ante dicha Comisión, en contra de autoridades federales por actos y omisiones en perjuicio de la población afectada por la utilización de plaguicidas de alta peligrosidad.

Conclusión

Con dicha evidencia, es claro que se deben tomar medidas urgentes y estrictas en el control y uso de plaguicidas, tanto los incluidos en el convenio como otras sustancias, ya que aún en bajas concentraciones pueden causar daños permanentes en el ambiente y la salud. Por último, es importante apoyar la transición hacia una agricultura no contaminante a través de la generación y aplicación de alternativas para el control de plagas. Actualmente, existen opciones que no han tenido la suficiente promoción y apoyo para implementarse a gran escala. De esta manera se daría no sólo seguridad ante prácticas y sustancias que ponen en peligro la salud de productores y de la población en general en México, sino que se brindarían herramientas prácticas indispensables para que la disminución de contaminantes sea una realidad.

Victoria Conde-Avila

Universidad Autónoma de Occidente.
victoria.condea@gmail.com

Carmen Martínez-Valenzuela

Universidad Autónoma de Occidente.
camava9@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Martínez-Valenzuela, C., S. M. Waliszewski, O. Amador-Muñoz, E. Meza, M. E. Calderón-Segura *et al.* (2017), "Aerial pesticide application causes DNA damage in pilots from Sinaloa, Mexico", *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(3):2412-2420. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7974-5>, consultado el 18 de abril de 2025.
- Martínez-Valenzuela, C., G. Romano-Casas, A. A. Cuadras-Berrelleza y L. D. Ortega-Martínez (2019), "Plaguicidas, impacto en salud y medio ambiente en Sinaloa (México): implicaciones y retos en gobernanza ambiental", *Trayectorias Humanas Transcontinentales*, 4:103-122. Disponible en: <https://www.unilim.fr/trahs/1615>, consultado el 18 de abril de 2025.
- Martínez-Valenzuela, C., A. Martínez-Arroyo, D. Barrientos-Alemán, A. Gavilán-García, M. Caba *et al.* (2022a), "Persistent organic compounds in human milk and evaluation of the effectiveness of the Stockholm convention in Mexico", *Environmental Advances*, 8:100190. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100190>, consultado el 18 de abril de 2025.
- Martínez-Valenzuela, C., A. Gavilán-García, V. Conde-Avila, D. Barrientos-Alemán, M. Apodaca-Ávalos *et al.* (2022b), "Applying the Global Monitoring Plan and analysis of POPs results in atmospheric air in Mexico (2017–2018)", *Chemosphere*, 303(2):135154. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135154>, consultado el 18 de abril de 2025.
- Semarnat (2016), "Plan Nacional de Implementación del Convenio de Estocolmo sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. México" [en línea]. Disponible en: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-NIP-Mexico-COP5.Spanish.pdf>, consultado el 18 de abril de 2025.
- Semarnat (2022), "Programas de gestión para Mejorar la Calidad de Aire (ProAire)" [en línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/semarnat/acciones-y-programas/programas-de-gestion-para-mejorar-la-calidad-del-aire>, consultado el 18 de abril de 2025.
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2021), "Third regional monitoring report region of Latin America and the Caribbean global Monitoring Plan for Persistent Organic Pollutants" [en línea]. Disponible en: <https://chm.pops.int/portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-GMP-RMR-GRULAC-2021.English.pdf>, consultado el 18 de abril de 2025.

Amanda Kim Rico Chávez y Ramón Gerardo Guevara González

El estrés vegetal: principios, aplicaciones y perspectivas

Las plantas son la base de la alimentación humana y fuente imprescindible de medicamentos y materias primas. Por esa razón, los científicos buscan desarrollar tecnologías para optimizar su aprovechamiento. La exposición de las plantas a cierto grado de estrés es una técnica agrícola que permite estimular respuestas positivas con un sinnúmero de aplicaciones relevantes, técnica de la cual queda mucho por descubrir.

Introducción

Es probable que por experiencia tengamos una buena idea de lo que es el estrés y lo que provoca en nuestro organismo. Cuando tenemos muchas preocupaciones, entramos en un estado de tensión que nos impide dormir y, en general, vivir normalmente. Pero, ¿qué pensarías si te dijeran que el estrés puede ser bueno? Para aclarar esta idea, comencemos definiendo qué es el estrés.

El estrés es una condición natural que prepara a cualquier ser vivo para enfrentar los retos de su entorno. Consiste en un estado de tensión que se desata al reconocer una situación difícil y que provoca respuestas en el organismo que lo fortalecen temporalmente. Esto ocurre, por ejemplo, cuando nos ejercitamos o nos esforzamos estudiando para un examen. Cuando la situación estresante termina (la prueba física o el examen), nos sentimos realizados y más fuertes que antes. Pero cuando la tensión es prolongada, repercute en la salud, provocando incluso una enfermedad grave. Algo similar ocurre en otros seres vivos, como las plantas.

Existen factores físicos, químicos o biológicos que pueden provocar estrés en las plantas, y puesto que son incapaces de moverse y huir, ellas han desarrollado un complejo sistema de defensa o adaptación. Además de poseer barreras físicas, como espinas y cortezas duras, las plantas también se protegen de las amenazas mediante una “guerra química”. Ante una situación peligrosa, una planta sintetiza compuestos químicos que le permiten ahuyentar herbívoros, controlar infecciones, e incluso comunicarse con otras plantas. Estos compuestos son los metabolitos especializados, y les confieren a las plantas su sabor, olor y sus propiedades medici-



nales. Por esta razón, los metabolitos especializados también son de gran importancia para los seres humanos, y un estrés que provoque su aumento en las plantas cultivadas es deseable. Pero, ¿cómo sabemos que ese estrés no perjudicará al cultivo?

El secreto está en la dosis. Hace poco más de 500 años, el médico suizo Paracelso formuló la célebre frase “la dosis hace al veneno”, que se convirtió en una máxima de la toxicología. Este enunciado evidencia que la toxicidad de una sustancia depende de la cantidad en la que se consume; así, aunque la sustancia se considere saludable, resulta dañina en una cantidad mayor de la recomendada, como ocurre con los medicamentos. Y aún más interesante es que, de modo contrario, también un factor considerado nocivo puede ser benéfico en una dosis mínima.

Con esta base, ha sido posible estimular la síntesis de metabolitos especializados en las plantas mediante su exposición a niveles bajos de estrés. Este evento, conocido como eustrés (del prefijo griego *eu*, que significa “bueno”), permite mejorar los rendimientos y la calidad de los cultivos. En el contexto actual de creciente presión demográfica y cambio climático, optimizar la producción agrícola es más urgente que nunca, ya que todos dependemos de los cultivos no sólo para nuestra alimentación, sino también para la obtención de textiles, medicamentos y otros productos esenciales. En este artículo profundizaremos en las respuestas específicas que el manejo del eustrés permite estimular en las plantas y cómo podemos aprovecharlas para desarrollar tecnologías en beneficio de nuestra sociedad.

Tipos de estrés vegetal

La supervivencia de las plantas depende de su aptitud para adaptarse a las condiciones ambientales. Por esa razón, los organismos vegetales son capaces de enfrentarse a muchos estresores distintos, tanto bióticos como abióticos. El primer grupo incluye seres vivos, como microorganismos, insectos, aves e incluso otras plantas, y sustancias derivadas de ellos. El segundo grupo se refiere a los factores ambientales, como la disponibilidad de agua o luz, la temperatura, e incluso ondas acústicas.

Para que una planta active su respuesta defensiva o adaptativa, primero debe percibir el estrés. Esto ocurre en la membrana celular, la capa externa de la célula vegetal. En esta membrana hay receptores, que son proteínas especiales. Cuando los receptores detectan el estrés, envían un mensaje, por medio de reacciones químicas, al núcleo de la célula. Allí, el mensaje se convierte en instrucciones que se distribuyen al resto de la planta para organizar la defensa. La **Figura 1** muestra un esquema de este proceso, conocido como señalización celular.

Algunas de estas indicaciones defensivas modifican el crecimiento de la planta, y pueden observarse a simple vista. Un ejemplo es cuando la disminución de la temperatura ambiental provoca que las hojas tomen un tono amarillento y se caigan; un fenómeno característico del otoño. Otras respuestas de las plantas al estrés no pueden observarse a simple vista, pero también son relevantes, como la defensa antioxidante. El estrés provoca la sobreproducción de compuestos oxidantes que dañan las moléculas más importantes de las células: los lípidos, los carbohidratos, las proteínas y los ácidos nucleicos. Para evitar el daño, las plantas producen antioxidantes,

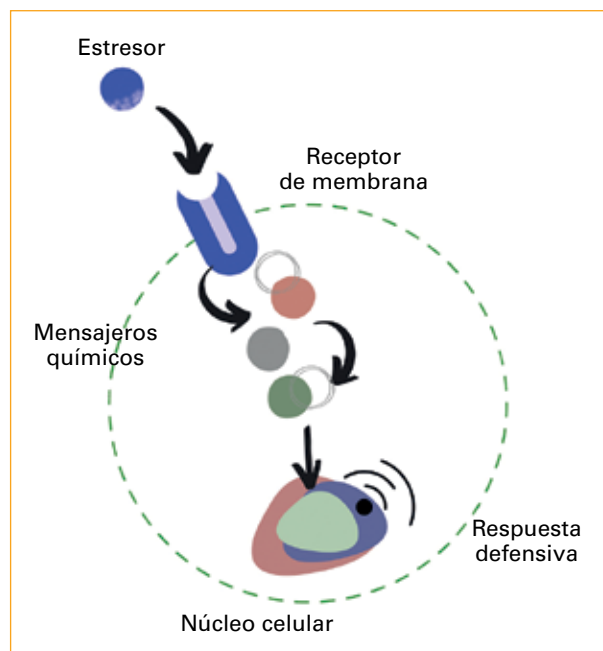


Figura 1. Señalización celular vegetal. Una vez que el estresor se percibe en la membrana, el mensaje es transmitido al núcleo, en donde se desencadena la respuesta defensiva. Fuente: elaboración propia.

moléculas que pueden encontrarse en distintas especies vegetales, como el té verde (*Camellia sinensis*) y los arándanos (*Vaccinium* spp.), y que son benéficas para sus consumidores. De hecho, en condiciones de estrés controlado, se ha encontrado que las plantas pueden producir hasta un 300% más de compuestos antioxidantes (Kandoudi y Németh-Zámoriné, 2022). Los antioxidantes y todos los metabolitos que las plantas sintetizan también se encuentran en los productos obtenidos a partir de estos cultivos, por lo que podemos encontrarlos en el vino, la leche de soya y en alimentos que contienen frutas.

■ Aplicaciones de los metabolitos especializados de las plantas

■ En realidad, una gran cantidad de productos industriales provienen de los metabolitos de defensa de las plantas. Entre tales compuestos podemos mencionar a los aceites esenciales, a los compuestos utilizados en perfumería y a los saborizantes. La industria alimentaria también hace uso de los productos vegetales para obtener pigmentos y suplementos nutricionales que se añaden a los alimentos procesados. Por ejemplo, el β -caroteno, compuesto cuya función es proteger a las plantas de la radiación solar, se añade a productos de repostería y jugos embotellados con una doble función: proporcionarles un color amarillo y otorgarles valor nutrimental. Esto último debido a que el β -caroteno en el cuerpo humano es un precursor de la vitamina A, un nutriente que favorece la vista y es necesario para mantener los huesos y la piel sanos.

Las aplicaciones de los metabolitos especializados de las plantas se extienden también a la industria farmacéutica, pues cerca de un tercio de los medicamentos provienen de plantas y sus derivados. Para su uso, los metabolitos pueden extraerse del material vegetal y purificarse, o el material vegetal puede consumirse directamente para obtener el efecto terapéutico, esto es, la fitoterapia. Quizás el ejemplo más célebre es el del ácido acetilsalicílico, registrado originalmente por la empresa Bayer con el nombre de Aspirina en 1899. La fuente natural de este medicamento es la corteza del sauce blanco (*Salix alba* L.),



un árbol cuyos primeros registros de uso medicinal se remontan hasta hace 4000 años. Algunos otros medicamentos notorios derivados de plantas son el paclitaxel (anticancerígeno), la morfina (sedante), la quinina (antimalárico) y la reserpina (antihipertensivo). Otros ejemplos de metabolitos especializados de plantas y sus usos pueden observarse en la **Figura 2**.

Entre los metabolitos especializados de las plantas, hay otros cuya función principal es la comunicación celular. Estos compuestos pueden llevar mensajes químicos a tejidos cercanos de la misma planta o de otras, generando respuestas defensivas preven-

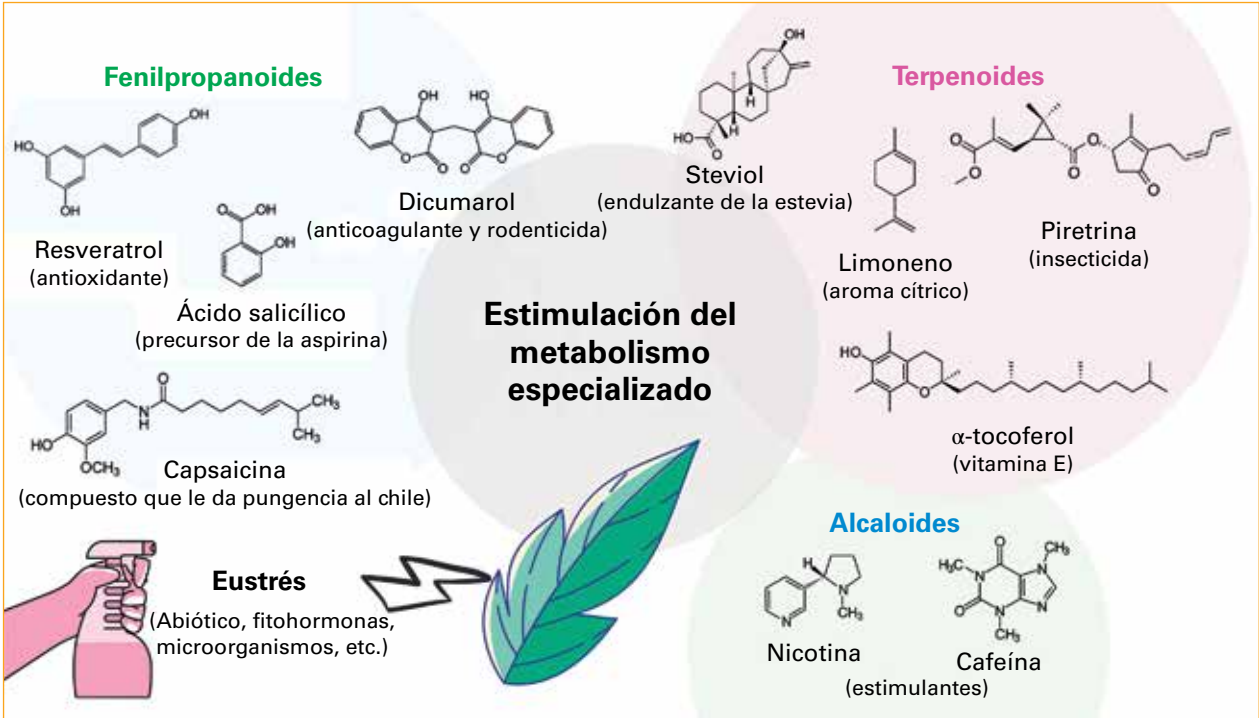


Figura 2. Estimulación del metabolismo especializado mediante el manejo del eustrés. Las plantas sintetizan una gran variedad de compuestos químicos para contrarrestar los efectos del estrés. Muchos de ellos tienen aplicaciones relevantes para la industria alimentaria y farmacéutica. Fuente: elaboración propia.

tivas. Dado que todas las etapas del desarrollo de las plantas están determinadas por cambios en la concentración de estos metabolitos, es común referirse a ellos como hormonas vegetales o fitohormonas o reguladores del crecimiento. Las fitohormonas permiten controlar el desarrollo de las plantas para su explotación agrícola, y su aplicación también causa un tipo de eustrés vegetal.

Manejo del eustrés vegetal

Hasta este punto hemos revisado cómo el estrés estimula el metabolismo vegetal y genera respuestas defensivas en las plantas desde un punto de vista bioquímico. En esta sección explicaremos cómo puede utilizarse este conocimiento para desarrollar tecnologías.

Existen varias formas de exponer los cultivos a condiciones controladas de estrés. La **Figura 3** ilustra algunos ejemplos de estrés, como la limitación de los riegos en ciertas etapas del desarrollo o las podas programadas. Las fitohormonas pueden aplicarse

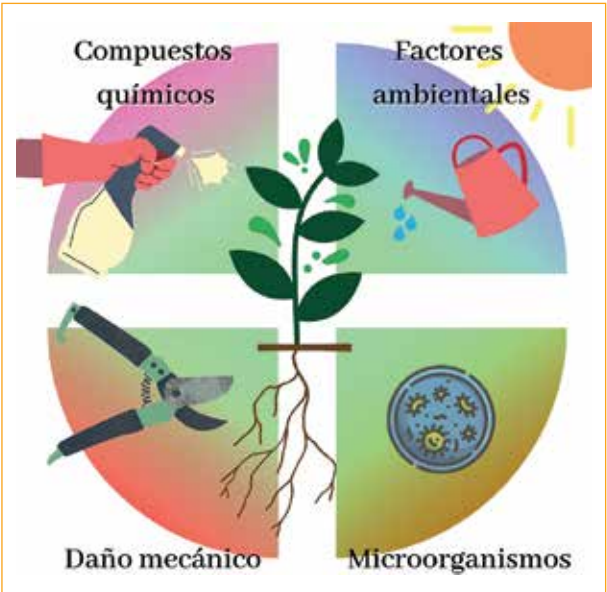


Figura 3. Tipos de estrés vegetal usados en tecnologías agrícolas. Las plantas pueden exponerse deliberadamente a estresores mediante el daño mecánico, la aspersión de compuestos químicos, la inoculación de microorganismos y el control de factores ambientales tales como el riego, la temperatura y la exposición solar. Fuente: elaboración propia.

en las hojas por aspersión, de la misma manera que otros estresores de naturaleza química y su aplicación en cultivos pueden aumentar hasta en un 98 % la producción de aceites esenciales (Kandoudi y Németh-Zámoriné, 2022). Sin embargo, el control preciso de condiciones como la temperatura o la exposición solar requiere de herramientas más sofisticadas, como invernaderos de alta tecnología.

Los organismos vivos también pueden emplearse como estresores bióticos para la agricultura. Las plantas son capaces de percibir microorganismos del suelo, lo que desencadena una respuesta defensiva. Esta respuesta suele incluir la síntesis de fitohormonas, que actúan regulando el metabolismo y el crecimiento del cultivo. Adicionalmente, algunos microorganismos benéficos se alimentan de compuestos insolubles del suelo y los transforman en nutrientes que las plantas pueden absorber, funcionando como un fertilizante biológico. Por esas razones, la inoculación de ciertos microorganismos en el suelo es una práctica cada vez más utilizada que trae beneficios como la protección contra otros

microorganismos y el aumento de la productividad de los cultivos. Estas tecnologías ya se aplican en el campo mexicano. Un ejemplo es la inoculación de semillas de maíz con *Trichoderma asperellum*, un hongo microscópico que estimula la respuesta inmune de la planta y la protege contra ataques de otros hongos, como los del género *Fusarium*, cuyo crecimiento puede inhibir hasta en un 65 % (Silva-Martínez y cols., 2016).

Un ejemplo novedoso de tecnología para hacer incidir estresores en las plantas es el uso de nanopartículas. Las nanopartículas son pequeñísimas estructuras preparadas en el laboratorio a partir de distintos compuestos químicos. Su aplicación es sencilla, pues pueden suspenderse en un medio acuoso, lo que permite su aspersión sobre las hojas. El empleo de nanopartículas ha permitido el desarrollo de una variedad de agroquímicos en nanoescala, tales como fertilizantes y plaguicidas. Además, gracias a que las nanopartículas poseen un área superficial mucho mayor, pueden tener el mismo efecto que los productos convencionales aun cuando se apliquen en menor



concentración. Esto reduce la cantidad de sustancias nocivas liberadas en el ecosistema y disminuye el impacto ambiental de la agricultura.

Es importante considerar que los niveles de estrés necesarios para obtener una respuesta positiva en las plantas varían según la especie, la etapa de desarrollo y los objetivos buscados. Sin embargo, es posible identificar generalidades que permitan diseñar tratamientos prácticos aplicables a la agricultura. Estas estrategias también pueden implementarse en nuestros jardines. Por ejemplo, una suculenta del género *Echeveria*, *Sedum* o *Kalanchoe* adquirirá una atractiva tonalidad rojiza si se expone al sol durante todo el día. En cambio, si preferimos que conserve un color verde, basta con colocarla en semisombra durante la mitad del día. De manera similar, disolver una aspirina o una cucharadita de agua oxigenada en un litro de agua y usar esta solución para asperjar las plantas cada quince días hará que luzcan más saludables ¡e incluso que produzcan más flores!



Biorreactor
Sistema de producción que funciona a base de una conversión biológica.

■ ■ ■ **Perspectivas**

■ La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024) estima que anualmente se pierden 109 millones de toneladas de productos agrícolas debido a eventos climáticos extremos. Por esta razón, un efecto muy relevante del manejo del eustrés es que puede incrementar la tolerancia de las plantas a otros estresores. Al activarse la defensa de una planta, el efecto protector puede mantenerse durante un tiempo, o generar una “memoria defensiva”. Esto último protege a la planta ante nuevos episodios estresantes que ocurran a mediano o largo plazo. De esta manera, una exposición temprana al eustrés podría permitir la sobrevivencia de una planta en condiciones cambiantes, o sea adaptarse, lo que representa una ventaja ante el cambio climático.

El aumento de la tolerancia al estrés también favorece a la fitorremediación, que consiste en usar plantas para recuperar sitios contaminados. Para este fin se utilizan especies vegetales con una capacidad extraordinaria de acumular sustancias tóxicas como metales pesados, hidrocarburos del petróleo y otros compuestos orgánicos. Una mayor tolerancia de las plantas al estrés que les causan los contaminantes aumenta su límite de absorción de éstos, lo que acelera la descontaminación del sitio.

Finalmente, otra técnica diferente de la agricultura convencional que también puede beneficiarse del manejo del eustrés es el cultivo de tejidos vegetales en medios sintéticos. La estimulación de la síntesis de metabolitos especializados en los cultivos celulares, en los que se controlan los componentes del medio, mejora la productividad de metabolitos específicos en los **biorreactores** de células vegetales. Esto conviene a las industrias farmacéutica y alimentaria e indirectamente favorece a las poblaciones naturales de plantas, pues suelen ser explotadas por el valor de sus metabolitos, a veces hasta el borde de la extinción.

■ ■ ■ **Conclusión**

■ El manejo del eustrés en las plantas responde a la necesidad de producir alimentos para la población;

sin embargo, esta técnica tiene diversas aplicaciones. Exponiendo los cultivos a condiciones controladas de estrés podemos mejorar su productividad, así como incrementar su valor nutricional y medicinal. Adicionalmente, el manejo del eustrés puede preparar a una planta para sobrevivir al ataque de patógenos, a la toxicidad del medio y al cambio climático.

Mucho se ha investigado en torno a la fisiología del estrés vegetal; sin embargo, la complejidad de los sistemas vivos hace que la resolución de una incógnita desvele otras nuevas. Lo que sabemos hasta ahora nos ha permitido encontrar numerosas soluciones creativas y aún hay mucho más por descubrir en este maravilloso ámbito del estudio de la vida. Por esa razón, es necesario fomentar la generación de tecnología en esta frontera del conocimiento mediante la formación de investigadores y la participación de la sociedad en el quehacer de la ciencia.

Amanda Kim Rico Chávez

Facultad de Química, Universidad Autónoma de Querétaro.
amanda.rico@uaq.mx

Ramón Gerardo Guevara González

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Querétaro.
ramon.guevara@uaq.mx

Lecturas recomendadas

- Castillo-España, P., I. Perea-Arango, J. J. Arellano-García y S. Valencia-Díaz (2017), "Qué son y para qué sirven los metabolitos de las plantas", *Ciencia y Desarrollo*, 43(288). Disponible en: <<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=227>>, consultado el 21 de abril de 2025.
- Cordonnier, M.-N. (2020), "La epigenética, moduladora clave de la evolución", *Investigación y Ciencia*, 520:70-75.
- FAO (2024), *Repercusiones de los desastres en la agricultura y la seguridad alimentaria 2023: Evitar y reducir las pérdidas mediante la inversión en la resiliencia*, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Kandoudi, W. y É. Németh-Zámoriné (2022), "Stimulating secondary compound accumulation by elicitation: Is it a realistic tool in medicinal plants in vivo?", *Phytochemistry Reviews*, 21:2007-2025.
- Moreno, M. J. (2016), "El estrés no es sólo cosa de humanos", *Cuaderno de Cultura Científica* [en línea]. Disponible en: <<https://culturacientifica.com/2016/11/03/estres-no-solo-cosa-humanos/>>, consultado el 21 de abril de 2025.
- Rico-Rodríguez, L. y A. Ortega-Rubio (2017), "Paradojas de la ciencia: el polémico ácido 2,4-diclorofenoxiacético (2,4-D) 'Nada es veneno, todo es veneno; la diferencia está en la dosis' Paracelsus", *Ciencia y Desarrollo*, 43(291). Disponible en: <<https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=282>>, consultado el 21 de abril de 2025.
- Silva-Martínez, K. L., R. Allende-Molar, D. Vázquez-Luna et al. (2016), "Antagonismo *in vitro* de *Trichoderma asperellum* contra *Fusarium* sp., agente causal de gomosis en cítricos", *Agroproductividad*, 9(6):20-25.

Anna Gisbrecht y Laura T. Hernández-Salazar

Más allá de la estética, la función del color en las flores y los frutos

De niños nos preguntamos: ¿por qué el cielo es azul?, ¿cómo sabe la abeja dónde recoger el néctar?, ¿por qué el pájaro sabe cuándo la fruta está madura? La mayoría de las respuestas las tiene la ciencia. En este artículo nos preguntamos: ¿por qué las flores y los frutos tienen colores en gamas de rojos a morados?, ¿pueden los animales guiarse por las tonalidades rojizas, azules y violetas de los frutos y flores en su búsqueda de energía?



El poder del color

Los frutos y las flores rojas, moradas y azules son muy populares porque son agradables a la vista y, en las frutas, el color se puede asociar con que sean muy sabrosas. Sin embargo, el color tiene otras funciones importantes, como evitar daños en la planta debido a la luz ultravioleta que proviene de los rayos del sol, lo que funciona de manera similar a la melanina en nuestra piel cuando nos exponemos al sol. Los compuestos responsables de las coloraciones rojas, azules y violetas en las plantas se llaman antocianinas y son parte de un gran grupo de sustancias químicas (Panche y cols., 2016). Además del color, las antocianinas tienen la capacidad de adherirse a la superficie de las frutas y las flores para servir de protector solar y actuar como fungicidas y bactericidas en beneficio de las plantas que las producen.

Por otra parte, el color en las plantas es un atrayente para algunos animales, que lo asocian con alguna recompensa, generalmente dulce. Así, las plantas pueden obtener beneficios en la polinización o dispersión de sus semillas. Sin embargo, el color en algunas plantas puede servir como una señal que indica que es tóxica y que si el organismo la consume corre riesgos. Entonces, podría decirse que el color les permite a las plantas tener una interacción con los animales que puede ser ventajosa para ambos, ya sea para consumirlas o evitarlas.





■ Una relación por conveniencia

■ Las plantas, como organismos inmóviles, parecen pasar su vida de forma pasiva. Aunque esto no es necesariamente cierto, las plantas han creado formas de comunicarse entre sí y con los animales de su entorno. Esta comunicación es ligeramente diferente a la que tenemos los humanos, porque no hay sonidos, ni gestos. Las plantas envían señales a los animales herbívoros u omnívoros para comunicarles que han producido algo sabroso y nutritivo, ¿y qué puede ser más rico que los azúcares? Es por ello que las plantas producen diferentes tipos de azúcares (sacarosa, fructuosa y glucosa), aunque también ofrecen almidón y proteínas, sustancias cruciales para la supervivencia y el crecimiento de los individuos. Pero claro, para que los animales se sientan atraídos, el empaque debe ser atractivo, y una de las formas de presentar estos productos es exhibir las flores y envolver los frutos con colores llamativos.

Ahora bien, tal y como pasa en los humanos, los animales asocian el color con la madurez del fruto. En las flores los colores y las formas suelen atraer ani-

males que buscarán obtener el polen o néctar y entrarán en contacto con los estambres o pistilos de las flores, facilitando la polinización. En los frutos, los colores intensos son señales de su madurez y de que están listos para ser consumidos, pues parte de esta labor de las plantas tiene el objetivo de estimular su consumo por los animales, dado que los frutos que un animal consume llevan en su interior las semillas, es decir, los embriones de las plantas. Por lo tanto, a través del consumo de frutos maduros, el animal sirve como dispersor, debido a que la semilla no es digerible, y conforme el animal se va trasladando, la probabilidad de que excrete la semilla lejos del árbol donde la consumió es muy alta. Es así como se ha planteado que, en esta interacción planta-animal, ambos se benefician. El animal recibe su premio y la planta asegura su supervivencia.

Curiosamente, la planta le ofrece al animal los mismos elementos que le sirven a ella misma en su crecimiento y desarrollo, productos que son nutritivos y dan energía. Pero las plantas tienen capacidad de realizar un segundo esfuerzo y usan su energía para



crear antocianinas, que son los pigmentos que generan las coloraciones rojas, azules, moradas o púrpuras y que funcionan como una señal visual de la madurez del fruto o atrayente en algunas flores. De hecho, altas concentraciones de estos compuestos están estrechamente relacionadas con altos contenidos de azúcares. Por ello, cuando los animales consumen frutos con dichas coloraciones fuertes y llamativas, es muy probable que se acerquen a probar el fruto asociando que es una fuente potencialmente rica en azúcar.

■ La función secreta de las antocianinas

■ Un dato interesante es que las antocianinas no son sólo pigmentos que indican la concentración de azúcar en un fruto, también son antioxidantes muy eficaces (Panche y cols., 2016). Se ha probado que su consumo frecuente puede prevenir enfermedades como el cáncer, la diabetes, las enfermedades vasculares, los trastornos neurológicos y neuropsiquiátricos. Por lo tanto, el consumo de frutos maduros con antocianinas también contribuye a mejorar el estado físico y el bienestar de los animales.

Así pues, al haber una relación plantas-animales de millones de años, se ha planteado que durante el curso de la evolución los animales pudieron haber adquirido la capacidad de preferir frutos con altos niveles de antocianinas, no sólo por ser una buena fuente de energía (lo que es notable poco después de la ingestión), sino por el beneficio que les proporciona en cuanto a mantener una buena salud –por ejemplo, manteniendo estables sus niveles hormonales–, lo que favorece un mejor manejo de las capacidades mentales y la estabilidad mental. Este hecho se ha probado en humanos, pero existen estudios que

muestran que algunas aves y orangutanes son capaces de detectar y preferir el consumo de antocianinas en alta concentración (Schaefer y cols., 2008). Sin embargo, existen aún más preguntas que abren un panorama para la investigación: ¿cuáles son las principales razones por las que los animales consumen antocianinas?, ¿son estas razones de naturaleza física o neural?, ¿son las coloraciones dentro de la gama de los rojos y azules el único indicio sobre el contenido de antocianinas? Estas preguntas muestran que hay mucho más que aprender de las plantas y sus compuestos, pero sobre todo que el color en las flores y frutos va mucho más allá de la estética.

Anna Gisbrecht

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

Laura T. Hernández-Salazar

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

Referencias específicas

- Mena-Violante, H. G. y P. D. Loeza-Lara (2019), “Una copa de antocianina, ¡ah qué buena medicina!”, *Revista Saber Más*, 8(44):16-19.
- Panche, A. N., A. D. Diwan y S. R. Chandra (2016), “Flavonoids: an overview”, *Journal of Nutritional Science* [en línea]. Disponible en: <<https://doi.org/10.1017/jns.2016.41>>, consultado el 18 de abril de 2025.
- Schaefer, H. M., K. McGraw y C. Catoni (2008), “Birds use fruit colour as honest signal of dietary antioxidant rewards”, *Functional Ecology*, 22(2):303-310.

César Espino de la Fuente-Muñoz y Clorinda Arias

El mundo dinámico de las mitocondrias

Las mitocondrias son organelos celulares responsables de proveer energía a las células eucariotas y poseen muchas características que sugieren un origen evolutivo independiente y su posterior adaptación simbiótica dentro de las células. Se considera que las mitocondrias forman redes cuyo contenido cambia dependiendo de las demandas energéticas celulares, por lo que su presencia es vital. Estos organelos poseen su propio material genético y son muy dinámicos, ya que se desplazan experimentando eventos de fisión y fusión que, en conjunto, se denominan dinámica mitocondrial. Además, pueden transferirse entre células y se han propuesto métodos de trasplante mitocondrial con potencial terapéutico. Estos increíbles hallazgos se comentarán a continuación, haciendo énfasis en el cerebro, un órgano con alta demanda energética.

Lo básico de las mitocondrias

La historia del estudio de las mitocondrias se remonta a 1857, año en el cual Rudolf Albert von Kölliker las describe por primera vez. Posteriormente, en 1890, Richard Altmann las denominó *bioblastos*, señaló su naturaleza ubicua y explicó que “vivían” dentro de las células y eran las responsables de sus “funciones elementales”. El nombre de *mitochondria* fue introducido por primera vez en 1898 por Carl Benda a partir de las palabras griegas *mitos* (hilo) y *chondros* (gránulo). Para 1961, Peter Mitchell propuso la *hipótesis quimiosmótica* en la que se plantea que la mayor parte de la síntesis de **ATP** se debe a la generación de un gradiente electroquímico dentro de las mitocondrias; y, en 1967, con base en similitudes bioquímicas y morfológicas, Lynn Margulis propone la teoría endosimbiótica para explicar que las mitocondrias alguna vez fueron bacterias de vida libre y que con el tiempo se adaptaron a **células eucariotas ancestrales**.

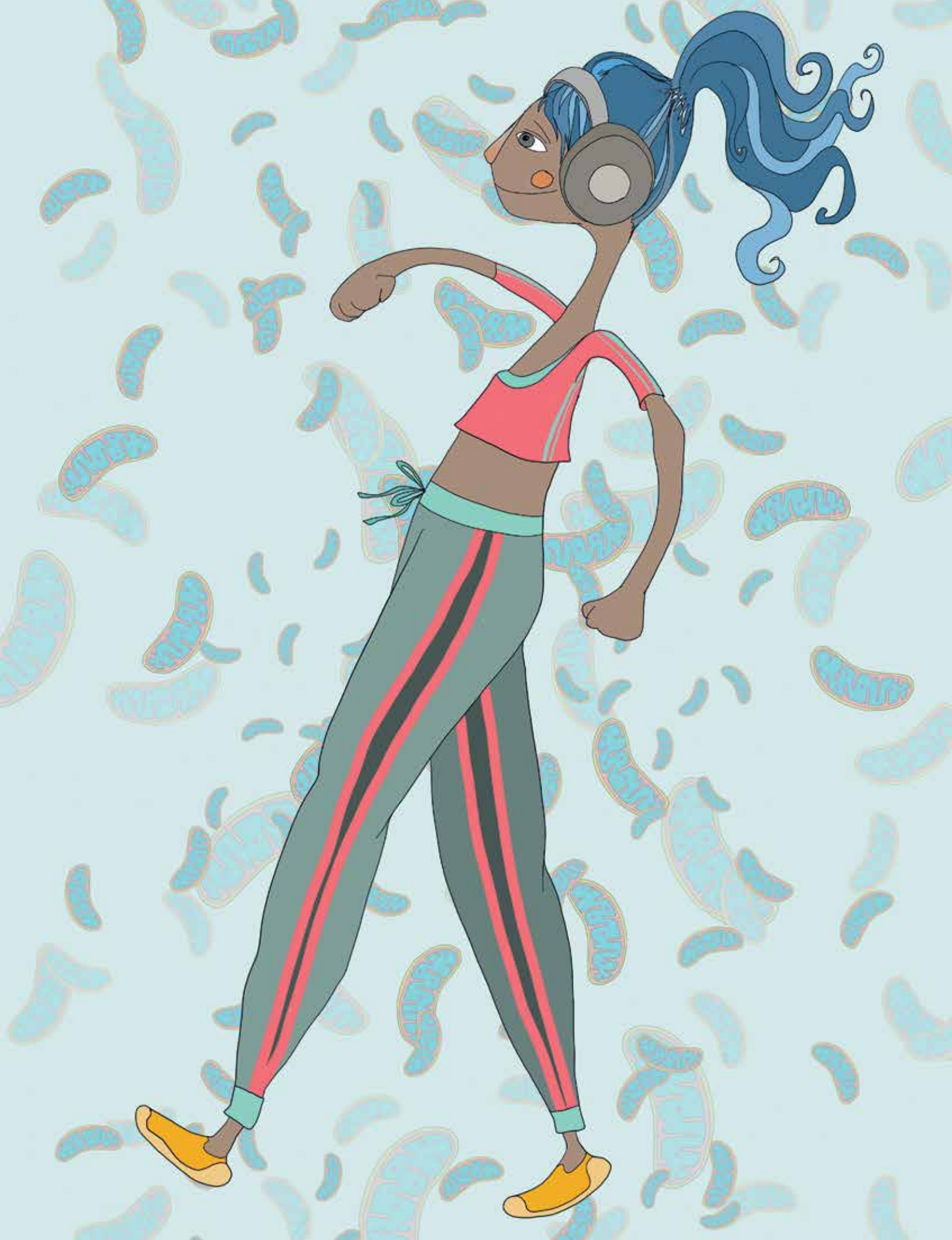
Las mitocondrias ocupan el 20 % del volumen celular. En algunas células llegan a formar largos filamentos móviles, o bien permanecen fijas en sitios que tienen una alta demanda energética. Estos organelos se caracterizan por sus formas

ATP

Trifosfato de adenosina. Es la principal molécula energética de las células, almacena y libera energía que es fundamental para las reacciones químicas que ocurren dentro de todas las células.

Células eucariotas ancestrales

Son los primeros tipos de células con núcleo definido que dieron origen a organismos complejos como animales, plantas, protistas y hongos.



ovoides y cilíndricas con un diámetro aproximado de 0.5 a 1 micrómetros, por tener su propio ADN y por contar con dos membranas muy especializadas. Estas membranas forman dos compartimentos separados: la matriz mitocondrial, donde se llevan a cabo procesos como el ciclo de Krebs, y un espacio intermembrana, importante en el proceso de respiración celular. Por un lado, la membrana externa sirve como puente de comunicación entre el contenido celular y la mitocondria, funcionando como un tamiz que regula el tránsito de moléculas hacia el interior de la mitocondria. Por su parte, la membrana interna forma una serie de pliegues conocidos como *crestas*, en donde se encuentran las enzimas de la cadena respiratoria que son necesarias para el proceso de fosforilación oxidativa, responsable de producir la mayor parte del ATP de prácticamente todas las células.

Ahora sabemos que con excepción de algunos parásitos unicelulares, todas las células eucariotas tienen mitocondrias, que estos organelos fueron en el pasado bacterias de vida libre y que hace alrededor de 1 500 millones de años fueron engullidos por una arquea del género *Asgard*, estableciendo así una de las simbiosis más importantes que se conocen. Con el tiempo, el ancestro bacteriano de la mitocondria se adaptó al contexto fisiológico del hospedero, lo que propició la remodelación de sus membranas, la

aparición de las crestas mitocondriales y el desarrollo de procesos como la dinámica mitocondrial. Lo anterior dio lugar a las primeras mitocondrias, lo que propició que los organismos se adaptaran a una atmósfera rica en oxígeno y permitió la diversificación de la vida.

■ ■ ■ Sumar y dividir: la dinámica mitocondrial

■ Las mitocondrias son altamente dinámicas y están sometidas constantemente a eventos de fusión y fisión, procesos que, junto con su transporte, forman parte de la dinámica mitocondrial (véase la **Figura 1**). Estos procesos que unen y dividen a las mitocondrias modulan su número, su forma y tamaño, manteniéndolas interconectadas en lo que se denomina *red mitocondrial*.

La fusión es el proceso por el cual dos o más mitocondrias se unen para formar una sola, lo que mantiene a la población de mitocondrias homogénea, facilitando el intercambio de enzimas y ADN mitocondrial. Los eventos de fusión están dirigidos por proteínas de la membrana externa llamadas *mitofusinas*, así como por proteínas que están en la membrana interna, como la proteína Opa1. Las mitofusinas son las responsables de unir mitocondrias que se encuentren contiguas, facilitando su an-

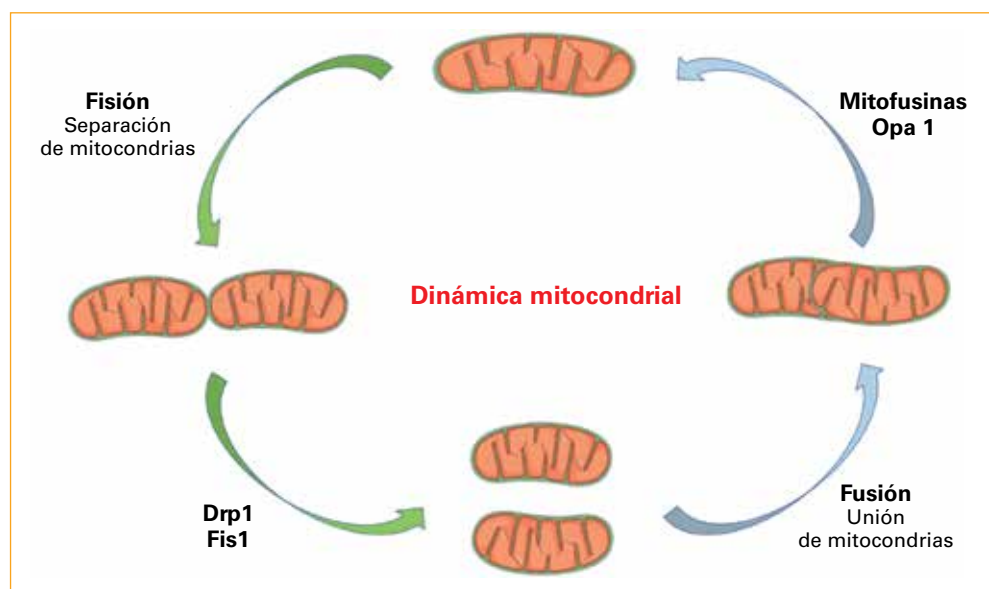


Figura 1. Dinámica mitocondrial.

claje y permitiendo que sus membranas comiencen a unirse. Por su parte, las proteínas Opa1 se encargan de que las membranas internas de las mitocondrias se unan, permitiendo que sus contenidos se mezclen, que las crestas mitocondriales se remodelen y por último que las mitocondrias preexistentes se fusionen completamente.

El proceso opuesto es el que se conoce como fisión, en donde una mitocondria se divide para dar origen a dos o más. La fisión es importante ya que ayuda a eliminar mitocondrias dañadas de la célula, apartando selectivamente el contenido dañado para ser degradado. Además, la fisión es necesaria ya que controla el tamaño de las mitocondrias para que puedan acceder a lugares pequeños, como las terminales sinápticas de las neuronas, donde aportan la energía necesaria para la neurotransmisión, que determina la función cerebral. El proceso de fisión está regulado principalmente por dos proteínas: Drp1, que se encuentra en el citoplasma, y Fis1, que está en la superficie de las mitocondrias. Para que las mitocondrias se dividan es necesario que Drp1 se una a Fis1, de manera que formen una espiral alrededor de la mitocondria, la cual formará un anillo encargado de constreñir a la mitocondria hasta separarla. Esta fisión puede darse de dos maneras distintas: la división por la mitad de la mitocondria, que ocurre en condiciones normales, y la división periférica, que ocurre con las mitocondrias que no son funcionales.

Una pérdida en el balance entre los procesos de fusión y fisión puede provocar deficiencias en el funcionamiento mitocondrial e incrementar la susceptibilidad de algunas células al daño. Por ejemplo, un exceso en la fusión puede generar mitocondrias en forma de rosca que en las neuronas se han relacionado con problemas en la memoria en monos envejecidos. Por el contrario, un exceso de fisión puede producir mitocondrias fragmentadas que son deficientes para manifestar sus propiedades energéticas.

El viaje de las mitocondrias: transporte mitocondrial
Otro proceso que también se incluye en la dinámica mitocondrial es el transporte de las mitocon-



drias, el cual consiste en su desplazamiento a través de la célula. Este transporte es más evidente en las células con morfologías especializadas, en donde la distribución de estos organelos no es homogénea, sino que depende de los sitios de alta demanda energética. Ejemplo de lo anterior son los sarcómeros de los músculos, las colas de los espermatozoides o las terminales sinápticas de las neuronas. Particularmente en las neuronas, las mitocondrias tienen que viajar grandes distancias desde el soma de la neurona hasta las dendritas y las terminales sinápticas. Estas distancias pueden ser desde algunas micras, como en el caso de una neurona del hipocampo, hasta varios centímetros, como los axones que forman el nervio ciático del humano, que va desde la cadera hasta los pies.

Los patrones de movilidad mitocondrial dentro de las neuronas también se caracterizan por constantes cambios de dirección, ya que las mitocondrias pueden detenerse en sitios específicos y luego volver a moverse en respuesta a cambios fisiológicos. Por un lado, el transporte de las mitocondrias desde el soma hacia otras partes de la neurona se denomina *anterógrado*, y en neuronas del hipocampo puede alcanzar velocidades de hasta 0.5 micras por segundo. Por su parte, se denomina transporte *retrogrado* cuando las mitocondrias se dirigen de lugares distales de la neurona hacia el soma, proceso que gene-

ralmente es más lento y ocurre a una velocidad de 0.25 micras por segundo. Ambas direccionalidades están reguladas por diferentes proteínas que unen a las mitocondrias con el citoesqueleto de las células. Las proteínas kinesinas participan en el movimiento anterógrado, mientras que las dineínas se encargan del movimiento retrógrado; asimismo, otras proteínas, como las Miro y sintafilina, sirven como motores de desplazamiento y de paro, respectivamente, sobre el citoesqueleto.

Los procesos de la dinámica mitocondrial deben estar altamente regulados para que las mitocondrias puedan abastecer de energía a las células y así llevar a cabo sus funciones fisiológicas. Cuando se presentan alteraciones en alguno de los procesos mencionados, las mitocondrias pueden volverse disfuncionales. En ciertos casos, esta disfunción se ha asociado con algunas enfermedades, como el síndrome de la atrofia óptica 1, la enfermedad de Charcot-Marie-Tooth y otras enfermedades neurodegenerativas, como la enfermedad de Parkinson y la enfermedad de Alzheimer.

Cardiomiocito

Son células musculares del corazón que, en conjunto, son responsables de su contracción y del bombeo de la sangre a todo el cuerpo.

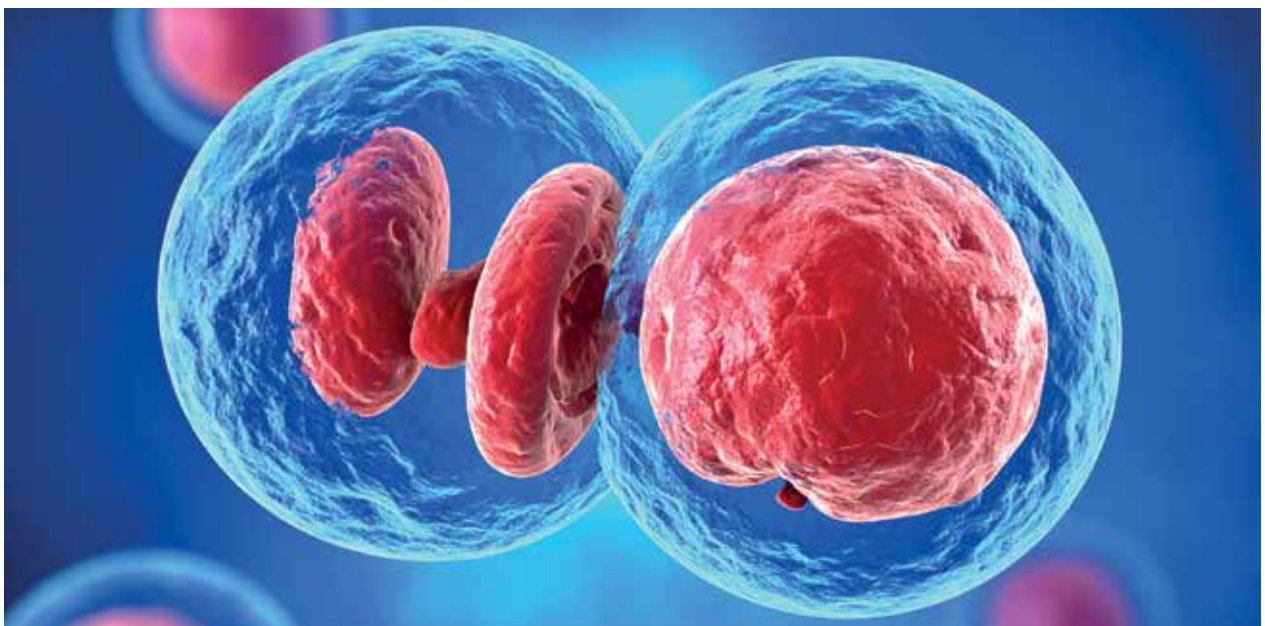
■ Saltos entre células: la transferencia mitocondrial

■ Como se ha visto, las mitocondrias son sumamente dinámicas dentro de las células, ya que cambian de

forma y se desplazan continuamente. Este dinamismo va todavía más allá y ahora sabemos que las mitocondrias también pueden moverse entre células y órganos de diferentes tipos, como los pulmones, el corazón y el cerebro. A este proceso de intercambio de mitocondrias entre diferentes células se le ha denominado *transferencia mitocondrial* y ocurre en los mamíferos de manera natural, y se incrementa cuando las células sufren algún daño.

La transferencia de mitocondrias consiste en la incorporación de mitocondrias funcionales a la red mitocondrial de una célula receptora, lo que ocasiona generalmente una mejoría en el funcionamiento mitocondrial y celular. Las primeras observaciones demostraron que, en modelos de lesión pulmonar, las mitocondrias de células madre podían transferirse a células epiteliales del pulmón, mejorando su respiración celular. Más adelante, se demostró que los **cardiomiocitos** pueden liberar sus mitocondrias dañadas para que los macrófagos puedan capturarlas y posteriormente eliminarlas.

La transferencia mitocondrial también se lleva a cabo en el sistema nervioso a través de un fenómeno llamado *transmitofagia*, que consiste en la formación de protuberancias en los axones de las neuronas, que agrupan mitocondrias dañadas que posteriormente son liberadas para que los astrocitos puedan captu-



rarlas y eliminarlas. De manera inversa, los astrocitos también pueden liberar y donar mitocondrias funcionales a las neuronas dañadas para incrementar la respiración y proporcionar neuroprotección.

Hasta la fecha, se conocen tres mecanismos por los cuales ocurre la transferencia mitocondrial entre células: la formación de nanotubos, el transporte por vesículas y la fusión celular, aunque esta última rara vez ocurre. Los nanotubos son extensiones del citoesqueleto que forman canales de comunicación entre células y miden entre 50 y 200 nanómetros de diámetro. Estos nanotubos hacen contacto entre células adyacentes y las conectan, permitiendo el intercambio de contenido intercelular de proteínas y organelos como las mitocondrias. El otro tipo de transferencia es mediante vesículas extracelulares que comunican las células a corta y larga distancia. En función de su tamaño, origen y contenido se clasifican en exosomas (30 y 100 nanómetros) y microvesículas (100 y 1000 nanómetros). Además de éstas, también se han observado vesículas de gran tamaño llamadas *vesículas gigantes*, que van de 1 a 8 micrómetros y que provienen de astrocitos. Otro caso de vesículas gigantes que transportan mitocondrias se encuentra en las neuronas del gusano *Caenorhabditis elegans*, que miden aproximadamente 4 micrómetros y han recibido el nombre de exóforos.

Además de los nanotubos y las vesículas, se ha descubierto que existen mitocondrias funcionales que viajan de manera libre en el líquido cefalorraquídeo y el torrente sanguíneo, incrementando el interés por saber cómo es que se liberan y hasta dónde pueden llegar.

■ ¿Mitoterapia?

■ Debido al avance en el conocimiento de la transferencia de mitocondrias en diversas células y tejidos, se han comenzado a estudiar las posibilidades de implementar el trasplante de mitocondrias para tratar algunas enfermedades que cursan con deficiencias bioenergéticas. Derivado de ello, han surgido varios modelos de estudio en donde hay avances significativos.

De manera general, el trasplante mitocondrial es una estrategia que consta de tres pasos: el aislamiento de las mitocondrias, su administración y por último su incorporación a las células o tejido objetivo. En primer lugar, el aislamiento de las mitocondrias para trasplante debe garantizar su viabilidad, además de que el proceso de aislamiento debe realizarse en el menor tiempo posible. Posteriormente al aislamiento, se debe determinar el número de mitocondrias a trasplantar. Algunos estudios mencionan que es su-



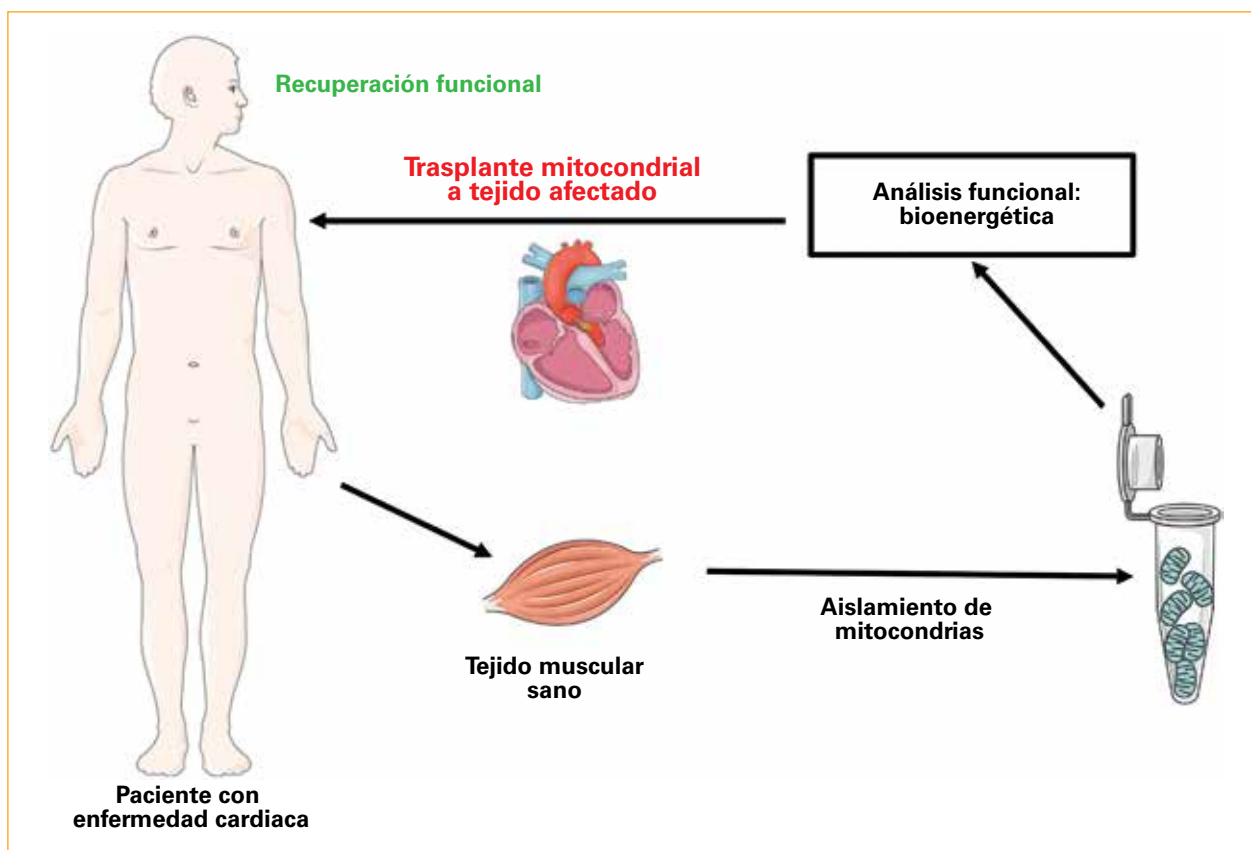


Figura 2. Trasplante mitocondrial a tejido afectado.

ficiente una concentración de 1×10^7 mitocondrias para ensayos de trasplante en el corazón.

En segundo lugar, el método de administración debe ser validado. En este sentido, se han desarrollado dos métodos principales para la administración de mitocondrias: la inyección directa al órgano dañado y la administración de manera sistémica. La inyección directa es eficiente ya que permite administrar una concentración directamente en el órgano de interés; sin embargo, en algunos casos resulta una estrategia invasiva, además de que se necesitan múltiples inyecciones para lograr una distribución amplia dentro del órgano afectado.

Por otro lado, la inyección sistémica a través de la vasculatura o de manera intranasal permite la distribución global de las mitocondrias administradas, lo que puede facilitar la entrega de mitocondrias a órganos de difícil acceso, como el cerebro, aunque su desventaja es que se pierde selectividad en cuanto al órgano objetivo. Por último, un factor importan-

te que debe considerarse es la respuesta inmune que pudiera desencadenarse. A este respecto, los resultados de varios estudios experimentales indican que las mitocondrias aisladas de tejido muscular no activan la respuesta inmune cuando son trasplantadas.

Las primeras observaciones de los beneficios del trasplante mitocondrial se realizaron en modelos animales, donde los trasplantes de mitocondrias en cuadros de enfermedades del corazón en cerdos y conejos produjeron una mejora de la función cardíaca, utilizando tanto la administración directa como la sistémica. Debido a que el trasplante mitocondrial ha mostrado resultados benéficos en modelos animales, se han realizado algunos estudios preliminares en humanos (véase la **Figura 2**). La primera aplicación clínica del trasplante mitocondrial se realizó en pacientes pediátricos con lesión cardíaca posnatal severa, a los que se les trasplantaron **mitocondrias autólogas** del músculo. En estos pacientes se produjo una mejora significativa que permitió que se les reti-

Mitocondrias autólogas
Mitocondrias extraídas de las células de un paciente y trasplantadas en el mismo individuo para reparar tejidos dañados, minimizando el rechazo inmunológico.

rara el soporte de oxigenación en el segundo día del trasplante. De manera más reciente, el trasplante de mitocondrias también se ha probado en niños que padecen enfermedades genéticas mitocondriales, con resultados prometedores, mejorando la producción de ATP, así como la fuerza y la resistencia muscular de los pacientes.

A partir de estas observaciones, se han desarrollado diversas estrategias de aislamiento y suministro de mitocondrias para el sistema nervioso, en los que destacan la administración de mitocondrias obtenidas de células en cultivo y administradas directa o sistémicamente en modelos de daño de la médula espinal, envejecimiento y la enfermedad de Parkinson, en donde las mitocondrias trasplantadas fueron capaces de incorporarse al tejido, restaurar las habilidades motoras y cognitivas de los animales, así como recuperar la función mitocondrial y proporcionar neuroprotección.

Comentarios finales

Durante años se ha documentado la importancia que tienen las mitocondrias como centrales energéticas de las células eucariotas. Ahora existe gran evidencia del papel que funge las mitocondrias más allá de la generación de la energía celular y es claro el dinamismo y la importancia que presentan estos organelos cuya disfunción se asocia a diversas patologías. El estudio de los procesos que subyacen a la restauración de la bioenergética celular a través de la transferencia mitocondrial, y de manera terapéutica al trasplante de mitocondrias, está encaminado a la restauración funcional de células y órganos para el tratamiento de enfermedades. Aunque estos estudios están iniciando desde un punto de vista

experimental, la evidencia apunta a que en un futuro el enfoque de recuperar la función mitocondrial será útil en el combate y la prevención de diferentes enfermedades.

César Espino de la Fuente-Muñoz

Departamento de Medicina Genómica y Toxicología Ambiental,
Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional
Autónoma de México.
cesarespinofm@hotmail.com

Clorinda Arias

Departamento de Medicina Genómica y Toxicología Ambiental,
Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional
Autónoma de México.
carias@unam.mx

Lecturas recomendadas

- Brestoff, J. R., K. K. Singh, K. Aquilano *et al.* (2025), "Recommendations for mitochondria transfer and transplantation nomenclature and characterization", *Nature Metabolism*, 7(1):53-67.
- Espino de la Fuente-Muñoz, C. y C. Arias (2021), "The therapeutic potential of mitochondrial transplantation for the treatment of neurodegenerative disorders", *Reviews in the Neurosciences*, 32(2):203-217.
- Espino de la Fuente-Muñoz, C., y C. Arias Álvarez (2022), "Mitocondrias en el cerebro y sus alteraciones en la enfermedad de Alzheimer", *Educación Química*, 33(2):18-36.
- Giacomello, M., A. Pyakurel, C. Glytsou y L. Scorrano (2020), "The cell biology of mitochondrial membrane dynamics", *Nature Reviews. Molecular Cell Biology*, 21(4):204-224.
- McCully, J. D., P. J. del Nido y S. M. Emani (2022), "Therapeutic Mitochondrial Transplantation", *Current Opinion in Physiology*, 27:100558.

Axel Castro Ábrego, Néstor Fabián Díaz Martínez y Guadalupe García López

¿De dónde provienen las células troncales pluripotentes?

Una mirada a sus fuentes

Las células troncales embrionarias humanas se consideran un modelo fantástico para estudiar el desarrollo embrionario y se ha propuesto su uso en terapias de reemplazo celular. Antes, sin embargo, deben superarse varios obstáculos. Por este motivo, investigadores de todo el mundo han buscado fuentes alternas y se ha propuesto utilizar las células del epitelio amniótico humano, ya que, además de tener características de células troncales, poseen propiedades antiinflamatorias, antibacterianas, antivirales y muestran bajo rechazo inmunológico. Estas células las podemos encontrar en las membranas fetales humanas, un tejido extraembrionario que se considera desecho médico después del nacimiento.

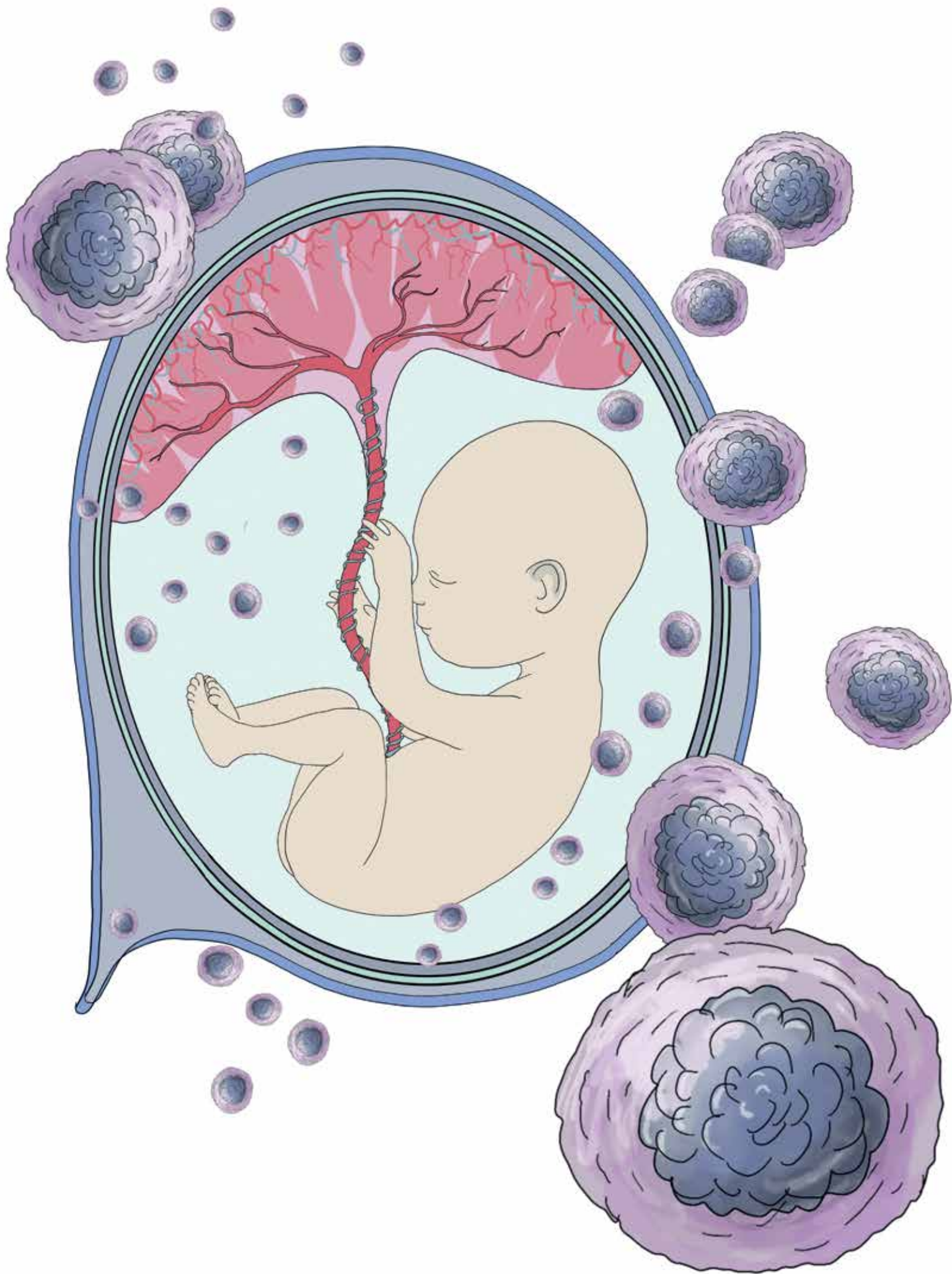
Células en el cuerpo humano

El cuerpo humano está formado por millones de células de distintos tipos, las cuales, al unirse y formar tejidos, realizan funciones muy específicas en nuestra vida diaria, como respirar, enviar la sangre a todo nuestro cuerpo, comer, pensar, por mencionar algunas. Estas células son generadas en su gran mayoría durante el desarrollo embrionario a partir de una sola célula sumamente interesante, que es conocida como *célula troncal* (también comúnmente llamada *célula madre*).

Células troncales

Las células troncales se distinguen por su capacidad de duplicarse por tiempo indefinido; es decir, dan origen a células idénticas a ella misma (autorrenovación) y convertirse en un tipo de célula con una función específica (diferenciación). Las encontramos desde etapas muy tempranas del desarrollo embrionario e incluso también en el cuerpo adulto; por ejemplo, en la piel, la médula ósea y el cerebro.

Lo interesante en la obtención de estas células es que pueden mantener sus propiedades intactas en cultivo, lo que nos permite conocer más acerca de esta



fascinante estirpe celular y analizar cómo se podrían utilizar en diferentes áreas de la biomedicina.

¿Cómo se clasifican las células troncales?

De acuerdo con su capacidad de producir tipos celulares especializados, las células troncales se clasifican en: totipotentes, pluripotentes, multipotentes y unipotentes. Las primeras se pueden convertir en todas las células que forman nuestro cuerpo, incluyendo a células de tejidos extraembrionarios, como las membranas fetales, las cuales protegen y mantienen saludable al feto hasta el momento del nacimiento; las pluripotentes tienen una menor capacidad de diferenciación y pueden convertirse en cualquier célula del cuerpo; las multipotentes se limitan a convertirse en células de un órgano o tejido –por ejem-

plo, las células troncales neurales pueden convertirse solamente en neuronas, astrocitos y oligodendrocitos, que son las células que forman nuestro sistema nervioso–; finalmente, las unipotentes sólo pueden transformarse en un tipo de célula, como es el caso de las células que forman la piel (véase la **Figura 1**). Las más estudiadas por los científicos son las células troncales pluripotentes.

¿Cómo se obtuvieron las primeras células troncales en el laboratorio?

M. Evans y G. Martin fueron los primeros en obtener células troncales pluripotentes (CTP) a partir de embriones de ratón. El doctor Evans y sus colaboradores lograron esta proeza al separar las células de la masa celular interna de un embrión de ratón

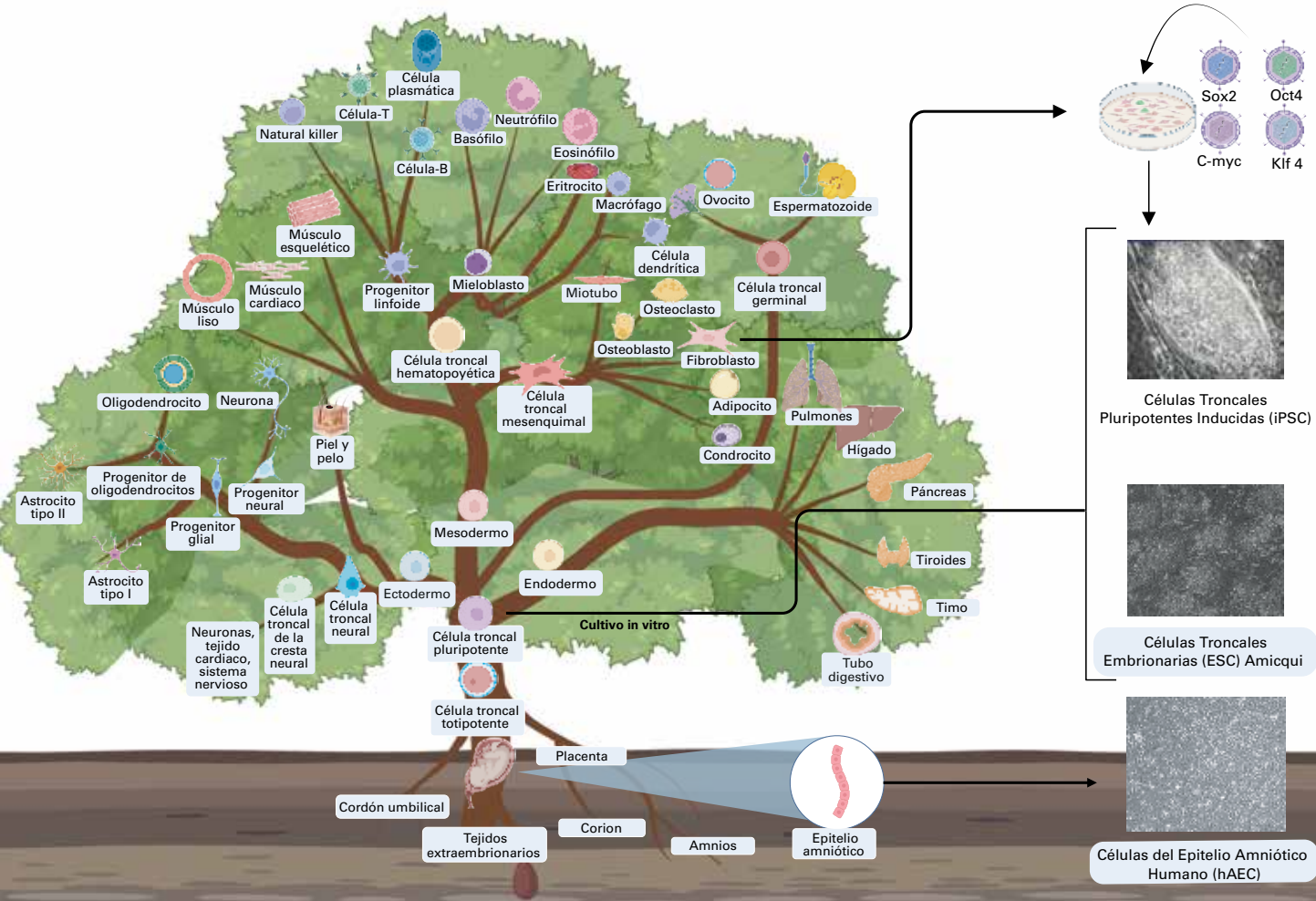


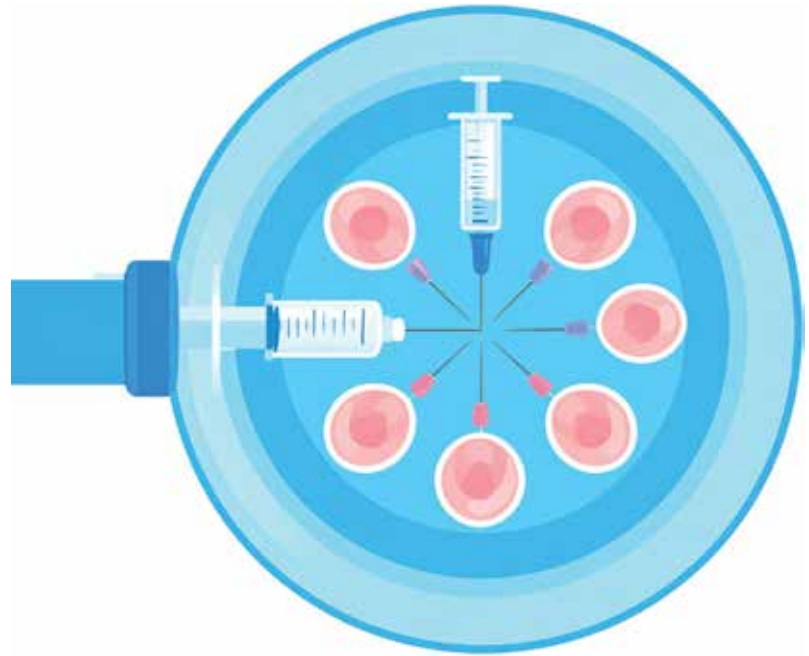
Figura 1. Tipos de células troncales, de acuerdo con su capacidad de producir tipos celulares diferenciados.

de 3.5-4.5 días de gestación. Posteriormente, para que las CTP pudieran crecer, alimentarse y dividirse, fueron colocadas sobre una capa de células, conocida como capa alimentadora o nodriza y que consiste en fibroblastos de embriones de ratón. Estos fibroblastos habían sido previamente cultivados en condiciones de laboratorio y tratados con mitomicina C (fármaco que inhibe la replicación del ADN y la división celular). Mientras, el doctor Martin cultivó las células internas del embrión en un medio generado a partir de células de carcinoma embrionario; es decir, un medio que estuvo en contacto con células de origen cancerígeno. De esta forma, en ambos casos se desarrollaron varios cúmulos de células conocidos como colonias, y así surgieron las células troncales embrionarias de ratón (CTER) (Evans y Kaufman, 1981; Martin, 1981).

Pero no fue sino hasta 1998 cuando el doctor J. A. Thomson y su grupo de colaboradores lograron obtener las primeras líneas de células troncales embrionarias humanas, a partir de embriones de cinco días de gestación, obtenidos por **fertilización in vitro**. De esta forma, una vez que los padres lograron el embarazo, los embriones sobrantes (supernumerarios) fueron donados para realizar investigación en esta área; con ello, las células de la masa interna fueron cultivadas —en las condiciones descritas por Evans y Martin en ratones—, y finalmente se obtuvieron cinco líneas de células troncales embrionarias humanas (CTEH) (Thomson y cols. 1998).

■ Pruebas de laboratorio para identificar las células troncales pluripotentes

■ La obtención de estas líneas de CTEH es apenas el comienzo de una aventura apasionante en el campo de la investigación científica, pues hay que demostrar mediante pruebas rigurosas que realmente se trata de una célula troncal y esto se debe a que estas células no tienen características de forma o estructura que nos permitan identificarlas bajo un microscopio. No obstante, debido a su naturaleza única, tienen características que pueden ser comprobadas en el laboratorio. Por ejemplo: presentan moléculas específicas (proteínas y genes, entre otras) que sólo



pueden encontrarse en estas células, y que cada una de ellas, dependiendo de su tipo, presenta, lo cual sirve para catalogarlas. De igual forma, se debe verificar su potencial de diferenciación para convertirse en células que componen todo el cuerpo, objetivo para el que existen diversos métodos, por ejemplo: en una placa de cultivo, los investigadores adicionan a las CTEH proteínas que les darán instrucciones específicas para convertirse en una célula especializada. Estos métodos se basan precisamente en replicar lo que ocurre durante el desarrollo embrionario del ser humano, y al obtener el tipo de célula deseado, se comprueba que posea las propiedades para realizar su función biológica; es decir, si se obtienen neuronas, éstas deben producir señales para comunicarse con otras neuronas.

■ ¿Cuál es la importancia de las CTEH?

■ Las CTEH se consideran un fantástico modelo de estudio para investigar eventos que ocurren durante el desarrollo humano y que tienen importantes consecuencias no sólo en el campo de las ciencias básicas, sino también en áreas clínicas, como son los defectos en el nacimiento, la infertilidad y la pérdida del embarazo; estos eventos resultan complicados de estu-

◀ **Fertilización in vitro**
Procedimiento médico utilizado por parejas infértiles para tener un embarazo, en el cual se realiza la fecundación a partir del óvulo de la madre y el espermatozoide del padre en una caja de cultivo.

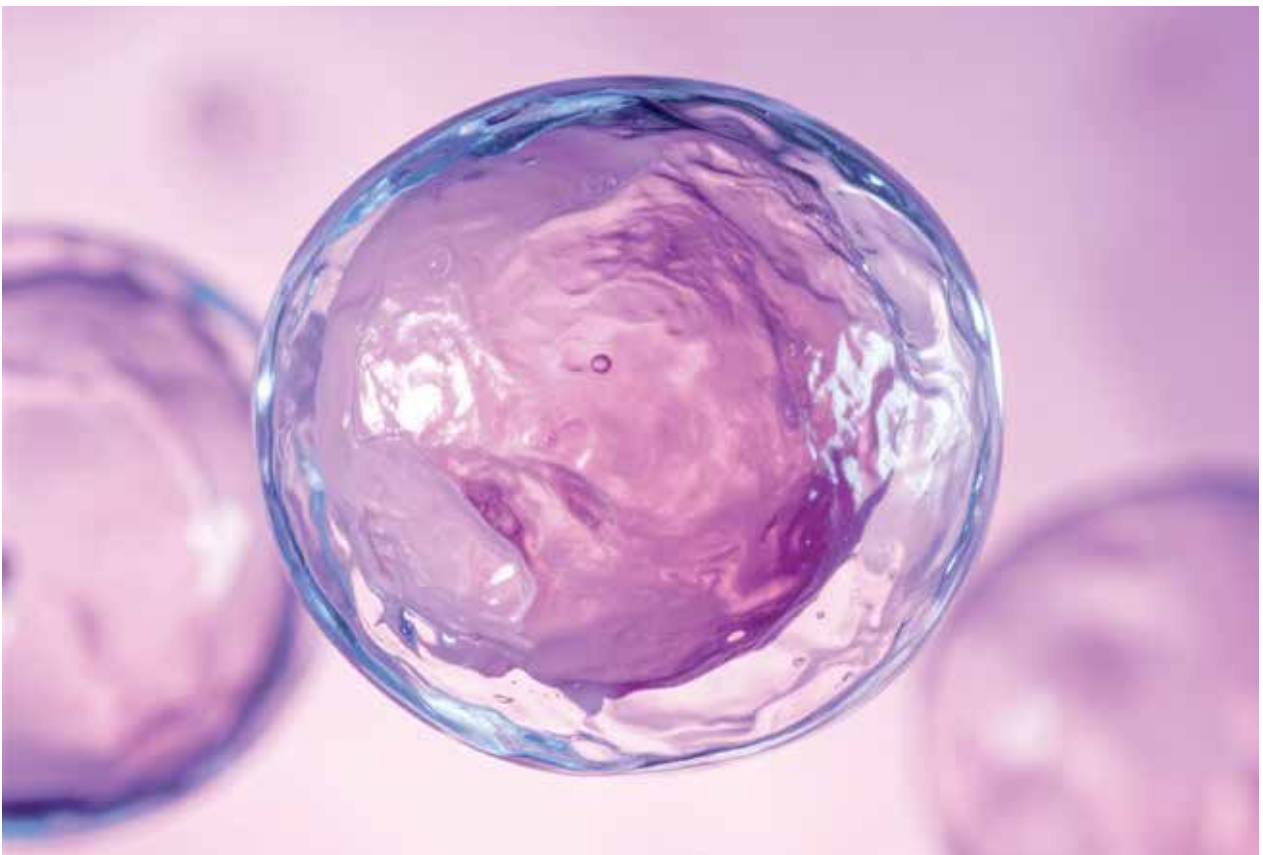
diar debido a la falta de modelos experimentales con condiciones semejantes a las de los seres humanos, así como por cuestiones ético-legales que limitan la posibilidad de hacer ciertos estudios con personas. Otro aspecto que también ha llamado la atención a nivel mundial, como ya se ha mencionado, es su capacidad de diferenciación en el laboratorio hacia diversos tipos de células, lo que nos permite descubrir los mecanismos que controlan la especialización celular, así como identificar genes involucrados en dichos procesos, información que es útil para la creación de métodos eficaces para la obtención de células diferenciadas y, con ello, poder utilizarlas en **terapias de reemplazo celular**. Por citar algunos casos, en la diabetes tipo I, enfermedad en que las células beta pancreáticas encargadas de producir insulina (proteína que controla los niveles de azúcar en el cuerpo) son afectadas, al recibir los pacientes nuevas células beta podrían tener una mejor calidad de vida; o en la enfermedad de Parkinson, donde se mueren de forma selectiva las neuronas dopaminérgicas de

un área específica del cerebro (lo cual provoca que los pacientes tengan movimientos involuntarios), el tratamiento sería reponer estas neuronas mediante la diferenciación de las células troncales. No obstante, a pesar de los resultados prometedores en los laboratorios de investigación, antes de que las cTEh se conviertan en una realidad en la clínica, quedan diversas barreras que se tienen que superar.

■ **Principales desafíos en el uso de las células troncales embrionarias humanas**

■ Uno de los principales desafíos en la obtención de las cTEh es el uso de embriones humanos en desarrollo, lo cual se ve reflejado en el número limitado de líneas celulares de este tipo. Si bien el número de líneas en bancos que las almacenan ha crecido relativamente, la diversidad de ellas se mantiene limitada; es decir, la mayoría de las líneas representan sobre todo a la población europea o asiática. De esta forma, el potencial benéfico que pudieran traer este

Terapias de reemplazo celular
Consisten en sustituir el tipo celular dañado, ya sea por una enfermedad, accidente o incluso por la vejez.



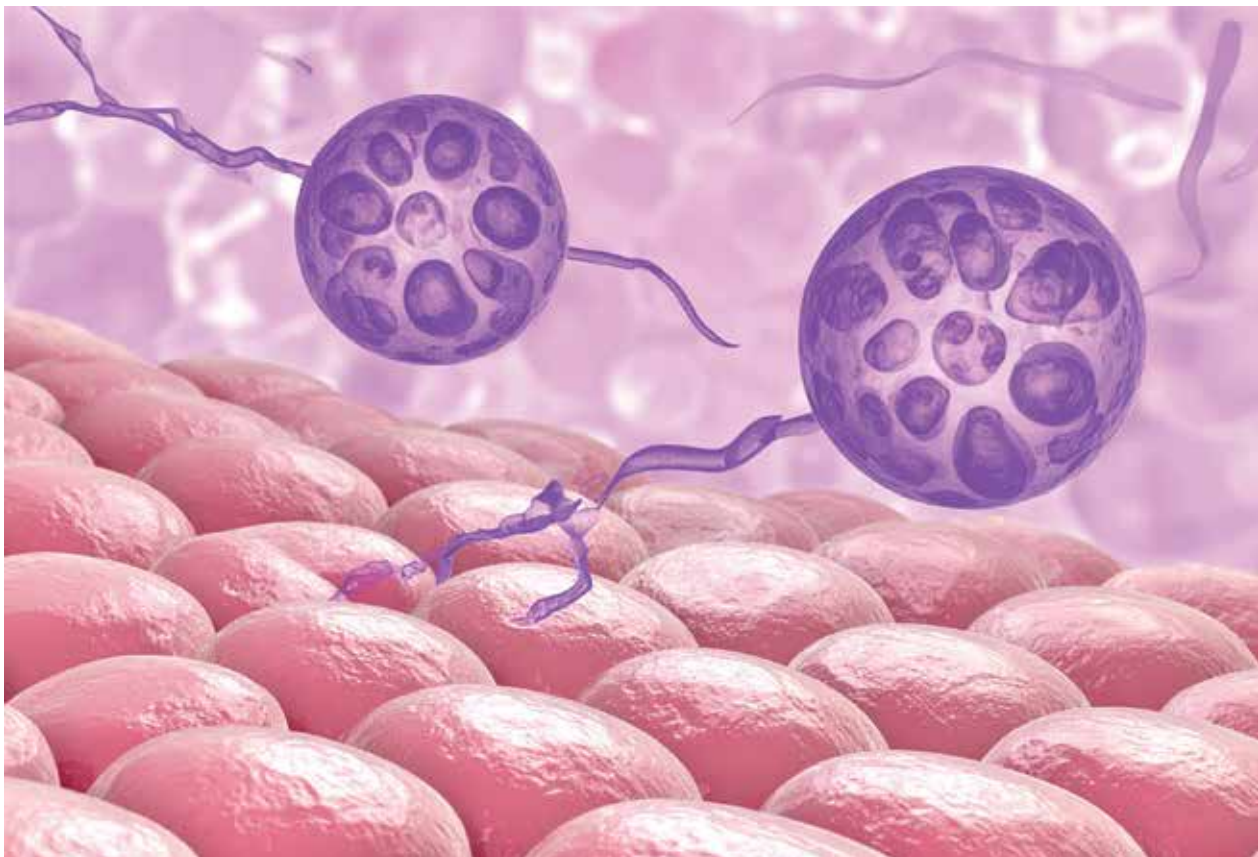
tipo de células sólo sería limitado para países que promueven este tipo de investigaciones, que por lo general son países desarrollados o de primer mundo. Otro gran desafío es que debido a su naturaleza, si se queda una población celular en estado indiferenciado y es trasplantada a un paciente, existe el riesgo de la formación de teratomas. Éstos son los motivos por los cuales se han buscado fuentes alternativas para la obtención de CTEH en todo el mundo.

Fuentes alternas de células troncales embrionarias humanas

Después de una labor titánica en el laboratorio y de una estrategia sin precedentes, el doctor Yamanaka logró crear células troncales a partir de células especializadas de la piel (fibroblastos), mediante el uso de cuatro factores de transcripción: OCT-4, SOX-2, KLF-4 y c-MYC (proteínas capaces de unirse específicamente al ADN, para apagar o prender genes), lo que permitió la creación de células troncales pluri-

potentes inducidas (hiPSC, por sus siglas en inglés; *human Induced Pluripotent Stem Cells*). La estrategia de reprogramación consistió en introducir las cuatro moléculas antes mencionadas mediante **vectores virales** y con ello lograron transferir la información genética a las células. De esta forma, al poder reprogramar células de un individuo adulto, puesto que éstas tienen toda la información necesaria para evitar problemas de rechazo al ser trasplantadas en la persona de la que fueron tomadas, pueden usarse en terapias celulares (Takahashi y cols., 2007). Sin embargo, se ha reportado que el proceso de reprogramación provoca que las células troncales inducidas que se obtienen tengan integrada información genética de los virus usados, lo que incrementa el riesgo de producir tumores (Lee y cols., 2013). De la misma manera, las células troncales inducidas conservan una memoria del tejido de origen, lo cual provoca que, al momento de diferenciarse en el laboratorio, estas células conservarán un sesgo en su capacidad de convertirse en el tejido de donde se obtuvo esa

Vectores virales
Vehículos para transferir proteínas a las células.



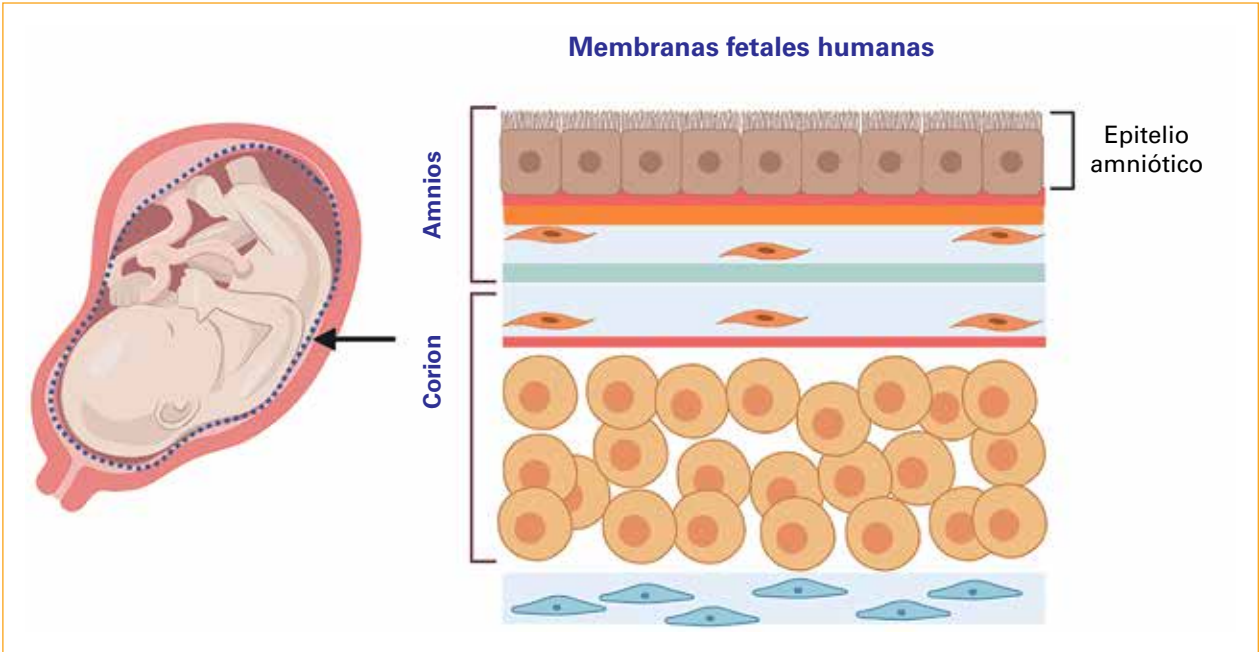


Figura 2. Estructura de las membranas fetales humanas.

célula (Kim y cols., 2010). Finalmente, estos procedimientos son complejos y costosos, motivo por el cual no todos los laboratorios en el mundo tienen libre acceso a ellos.

Otra posible fuente de obtención de células troncales sería a partir de tejidos adultos. Sin embargo, como es de imaginar, es difícil tomarlas, ya que se requieren métodos invasivos en los que es necesario realizar una incisión para llegar al sitio donde se encuentran. Asimismo, este tipo de células, como ya se mencionó, no poseen una capacidad de diferenciación a todos los tipos celulares que componen a un organismo y su obtención puede implicar problemas ético-legales. Por todo ello, en los últimos años se ha sugerido que las células troncales más adecuadas pueden encontrarse en los tejidos extraembrionarios y en especial en las membranas fetales humanas.

son desechados de manera rutinaria si el producto no presentó complicaciones durante el embarazo. No obstante, estos tejidos presentan algunas características muy importantes.

Los tejidos extraembrionarios están constituidos por la placenta, el cordón umbilical y las membranas fetales humanas (MFH) (véase la **Figura 2**). Ahora nos enfocaremos en las MFH, las cuales están conformadas por dos capas, denominadas amnios y corion. Entre las funciones específicas que tienen, está la de darle un ambiente libre de patógenos y de agentes inflamatorios al producto; es decir, tienen propiedades antibacterianas, antivirales y antiinflamatorias, permiten la tolerancia inmunológica entre el feto y la madre, soportan la deformación local y el estiramiento mecánico, entre otras. Además de todas estas características, en el amnios se encuentran unas células sumamente peculiares: las células epiteliales, las cuales pueden obtenerse y mantenerse en el laboratorio luego de un parto y con el **consentimiento informado de la paciente**. Dichas células en cultivo tienen una forma cuboide y son capaces de producir múltiples proteínas y moléculas que les permiten realizar las funciones ya descritas. No obstante, lo asombroso de ellas es que, a diferencia de todas las

Consentimiento informado del paciente
Documento legal mediante el cual se ceden los derechos del material biológico para poder realizar procedimientos médicos de diagnóstico o investigación.

■ ■ ■ **Membranas fetales y células del epitelio amniótico humano**

■ Los tejidos extraembrionarios, en general, han sido poco valorados en el campo de la medicina, pues debido a que cumplen su función después del parto,

otras células que componen a los tejidos extraembrionarios, éstas se originan en el **epiblasto**. De esta forma, posteriormente al parto estas células podrían tener características de células troncales pluripotentes. Por esta razón, en los últimos años se han realizado diversas investigaciones para demostrar esta hipótesis en laboratorios de todo el mundo.

Uno de los primeros indicios de su capacidad pluripotente proviene de estudios en donde se demostró que dichas células presentan moléculas específicas de células troncales pluripotentes (como ya se mencionó), así como la capacidad de diferenciarse en tipos celulares representativos de todo el cuerpo; por ejemplo, en el laboratorio se ha logrado su transformación en células del páncreas, neuronas y en células del corazón, entre otras, utilizando protocolos especializados de señales moleculares. Otra cualidad de las células del epitelio amniótico humano, que podría ser útil en la medicina regenerativa, es que han sido trasplantadas tanto en animales como en humanos y no presentan rechazo inmunológico ni formación de tumores.

Por lo tanto, podemos apreciar que las células del epitelio amniótico pueden ser una fuente novedosa de células troncales que podrán ser utilizadas en terapias de reemplazo celular y en modelos de estudio *in vitro* del desarrollo temprano, con la ventaja de que con ellas se pueden evitar los problemas ético-legales de las cteñ e ipsc. Sin embargo, es necesario continuar la investigación con esas dos líneas celulares, ya que seguirán siendo el estándar de oro del estudio de células troncales pluripotentes.

Epiblasto
Estructura que se encuentra en embriones de etapas muy tempranas de desarrollo, de donde se formarán todos los tejidos del cuerpo humano y se obtienen las cteñ.

Axel Castro Ábrego

Instituto Nacional de Perinatología.
2709@ciencias.unam.mx

Néstor Fabián Díaz Martínez

Instituto Nacional de Perinatología.
nfdiaz00@yahoo.com.mx

Guadalupe García López

Instituto Nacional de Perinatología.
guadalupegl2000@yahoo.com.mx

Referencias específicas

- Evans, M. J. y M. H. Kaufman (1981), "Establishment in culture of pluripotential cells from mouse embryos", *Nature*, 292(5819):154-156. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/292154a0>>, consultado el 3 de mayo de 2025.
- Kim, K. *et al.* (2010), "Epigenetic memory in induced pluripotent stem cells", *Nature*, 467(7313):285-290. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/nature09342>>, consultado el 3 de mayo de 2025.
- Lee, A. S. *et al.* (2013), "Tumorigenicity as a clinical hurdle for pluripotent stem cell therapies", *Nature Medicine*, 19(8):998-1004. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/nm.3267>>, consultado el 3 de mayo de 2025.
- Martin, G. R. (1981), "Isolation of a pluripotent cell line from early mouse embryos cultured in medium conditioned by teratocarcinoma stem cells", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 78(12):7634-7638. Disponible en: <<https://doi.org/10.1073/pnas.78.12.7634>>, consultado el 3 de mayo de 2025.
- Takahashi, K. *et al.* (2007), "Induction of pluripotent stem cells from adult human fibroblasts by defined factors", *Cell*, 131(5):861-872. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.cell.2007.11.019>>, consultado el 3 de mayo de 2025.
- Thomson, J. A. *et al.* (1998), "Embryonic stem cell lines derived from human blastocysts", *Science*, 282(5391):1145-1147. Disponible en: <<https://doi.org/10.1126/science.282.5391.1145>>, consultado el 3 de mayo de 2025.

Nemátodos de vida libre: diversos y en todas partes

Los nemátodos son gusanos invertebrados con una biología compleja y fascinante. Existen miles de especies de nemátodos y son los invertebrados más abundantes en suelos y sedimentos acuáticos. Todos los hábitats del planeta tienen nemátodos, desde las fosas abisales hasta los desiertos. Estos organismos contribuyen decisivamente al funcionamiento de los ecosistemas y al mantenimiento de la vida en la Tierra.

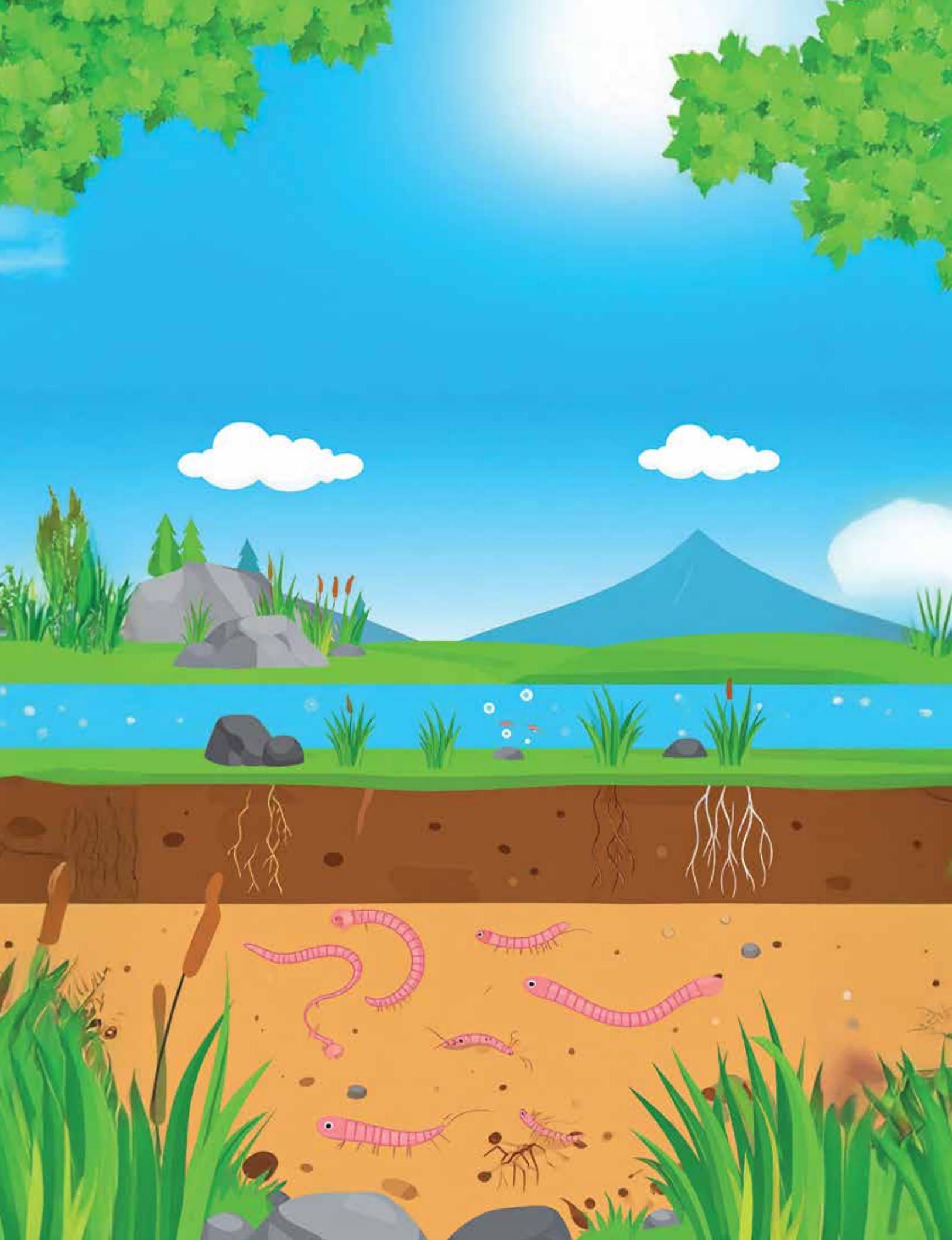
Introducción

Los nemátodos son un grupo de invertebrados con una morfología aparentemente simple que enmascara una biología compleja y fascinante. Pueden ser de vida libre o parásitos que afectan plantas o animales. De las aproximadamente 27 000 especies de nemátodos descritas, el 60 % son parásitas (15 % de plantas y 45 % de animales) y el 40 % restante son de vida libre. La división entre los modos *parásito* y *de vida libre* es fundamental, pues define campos de estudio diferentes. Los nemátodos parásitos de plantas son estudiados en las ciencias agrícolas, específicamente en la sanidad vegetal. Dado el daño económico significativo que los nemátodos causan en los cultivos, se dedican cuantiosos recursos a su control y manejo. Los nemátodos parásitos de animales (incluido el humano) son estudiados por la medicina, ya sea humana o veterinaria. No todos los nemátodos parásitos son dañinos, existen especies que en una fase de su ciclo de vida parasitan insectos que a su vez constituyen plagas de cultivos. Estos nemátodos **entomopatógenicos** se emplean en el control de plagas y, por tanto, son beneficiosos para la agricultura.

Los nemátodos de vida libre se subdividen en aquellos que habitan los suelos (nemátodos terrestres), los que viven en los sedimentos marinos (nemátodos acuáticos) y los que habitan sobre otros organismos (nemátodos epibiontes). En este ensayo nos enfocamos en diferentes aspectos morfológicos y ecológicos de los nemátodos de vida libre, incluidas algunas aplicaciones como organismos modelo.

Entomopatógeno

Nemátodos de dos familias (Steinernematidae y Heterorhabditidae) que parasitan insectos y funcionan como vectores de bacterias (*Xenorhabdus* spp. y *Photorhabdus* spp., respectivamente) que son los verdaderos patógenos de los insectos.



■ **Nemátodos: gusanos no segmentados**

■ Los nemátodos son gusanos transparentes; la mayoría de las especies tienen un cuerpo alargado con los extremos (cabeza y cola) aguzados. La estructura básica del cuerpo se caracteriza por un cilindro externo (la pared corporal), un cilindro interno (el tubo digestivo) y una cavidad llena de fluido entre ambos cilindros, que contiene también células y el sistema reproductivo. La mayoría de los nemátodos tienen un tamaño diminuto, en el orden de 1 mm de longitud, lo que requiere del uso de microscopios para su estudio.

La morfología de los nemátodos refleja su adaptación al ambiente; por ejemplo, la forma de gusano y el tamaño microscópico facilitan el movimiento

en el espacio entre las partículas de suelo o sedimento (**Figura 1A**). En la cabeza aparece la boca rodeada por un número variable de setas sensoriales y frecuentemente aparecen dos estructuras quimiorreceptoras a ambos lados, los ánfidos (**Figura 1B**). La cutícula muestra estructuras que permiten la adaptación al medio. Por ejemplo, las especies que habitan entre los granos de arena, sometidos a la influencia del oleaje, portan anillos gruesos que refuerzan la cutícula y setas sensoriales fuertes a lo largo del cuerpo (**Figura 1C**). Algunas especies se alimentan sólo de bacterias, por lo que su cavidad bucal es muy pequeña, y los ánfidos se desarrollan mucho ocupando una posición casi frontal en la cabeza (**Figura 1D**).

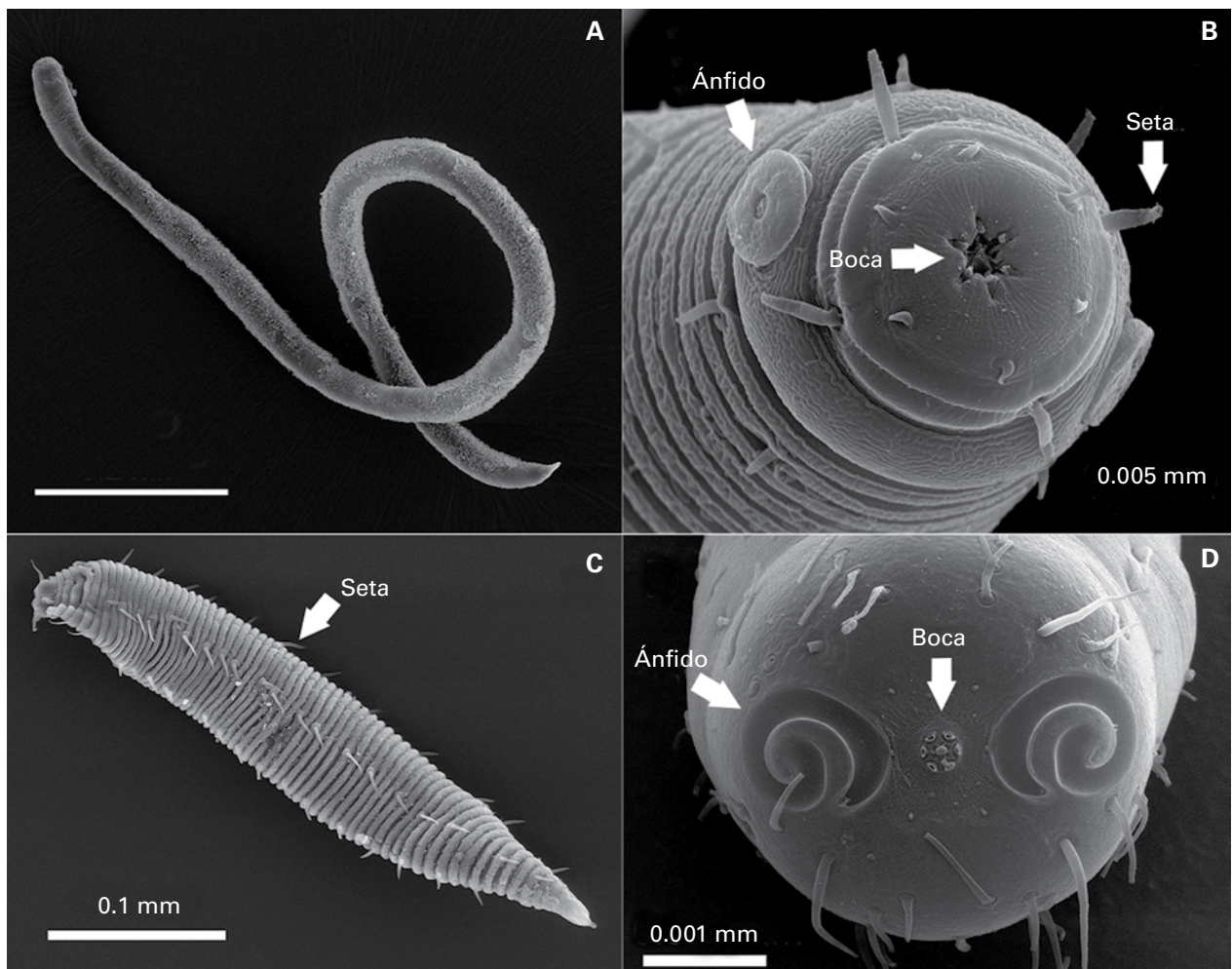


Figura 1. Fotos de nemátodos de vida libre al microscopio electrónico de barrido. Las flechas blancas indican las estructuras mencionadas en el texto. A) Cuerpo completo de *Leptonemella granulosa*, un nemátodo típico de arenas coralinas. B) Vista frontal de *Desmodora pontica*. C) Cuerpo completo de *Tricoma* sp. D) Vista frontal de *L. granulosa*. Imágenes originales del autor.

Los nemátodos tienen una amplia variedad de formas corporales y estrategias de vida. La única característica común a todo el grupo está relacionada con su desarrollo, que comienza con un huevo e incluye cinco eventos de muda. La propiedad de mudar la cutícula (conocida como *ecdysis*) es compartida por otros grupos de animales, como los artrópodos y los tardígrados. El estudio de la *ecdysis* en nemátodos fue fundamental para proponer modelos sobre las relaciones de parentesco entre los grupos de animales y generar teorías sobre la evolución de la vida.

Nemátodos: abundantes, ubicuos y diversos

 En 1914 Nathaniel Cobb escribió la frase “si toda la materia del universo excepto los nemátodos fuese barrida, nuestro mundo todavía sería vagamente reconocible, [...] encontraríamos sus montañas, colinas, valles, ríos, lagos y océanos representados por una fina película de nemátodos”. Esta frase se refiere a la abundancia de los nemátodos sobre la Tierra. De todos los grupos de animales, los nemátodos son los más abundantes, contribuyendo al menos en un 50% a la abundancia total en suelos y sedimentos. Sólo los virus y organismos unicelulares como bacterias y protistas son más abundantes que los nemátodos.

Los nemátodos ocurren en todos los hábitats de la Tierra. Se han reportado especies de estos organismos en uno de los sitios más profundos del océano, la fosa Kermadec en el Pacífico Sur, a 10 km de profundidad. El nemátodo *Halicephalobus mephisto* tiene el récord de ser el organismo multicelular que más profundo habita dentro de la corteza terrestre, aproximadamente a 1.3 km de profundidad en una mina de oro en Sudáfrica. Se pensaba que la biosfera bajo la superficie del planeta estaba habitada sólo por bacterias y protistas, pero con este descubrimiento se extiende el rango de distribución de los animales en el dominio subterráneo. Se han reportado además nemátodos que viven en otros ambientes extremos, con ausencia casi total de oxígeno o con acumulación de sustancias tóxicas. Por ejemplo, el nemátodo *Auanema* sp. es capaz de sobrevivir en el lago Mono, con aguas hipersalinas, de alta alca-

linidad, donde resiste 500 veces la dosis de arsénico que para un ser humano resultaría letal.

El término *diversidad* se refiere a la variedad de la vida y es una propiedad de las comunidades de organismos. Nematoda es el cuarto *phylum* más diverso de animales y se estima que más de la mitad de las especies no han sido descubiertas aún. Su éxito ecológico se debe a dos características generales. Primero, su capacidad de alimentarse de diversas fuentes de carbono en suelos y sedimentos, ya que pueden incorporar materia orgánica disuelta en el agua, o carbono en forma de partículas inertes, o depredar a microorganismos y otros animales. Segundo, son capaces de tolerar condiciones ambientales adversas, tanto mediante mecanismos de detoxificación en la cutícula o entrando en animación suspendida o criptobiosis, un estado fisiológico en el que el metabolismo se reduce a un nivel mínimo.

Recientemente, un equipo de científicos rusos extrajo muestras de suelo permanentemente congelado (permafrost) en Siberia y determinaron, con la técnica de fechado de carbono 14, que esas muestras tienen una antigüedad de 46 000 años. En las muestras encontraron nemátodos congelados de los géneros *Panagrolaimus* y *Plectus* que fueron capaces de reanimarse, e incluso reproducirse, a pesar de estar en estado de criptobiosis desde el Pleistoceno. Este descubrimiento abre nuevas perspectivas sobre la preservación, por miles de años, de muestras de células y tejidos y sobre el descubrimiento de especies que vivieron en el pasado geológico de la Tierra.

Los nemátodos como organismos modelo

 El nemátodo *Caenorhabditis elegans*, una especie terrestre de vida libre, es el modelo animal más empleado en estudios de biología celular y molecular. Los estudios sobre *C. elegans* comenzaron en 1965, con Sydney Brenner, ganador del premio Nobel en 2002 por sus investigaciones sobre la muerte celular programada. En la actualidad hay más de 1 000 laboratorios investigando sobre *C. elegans*, y existe un sitio web permanente sobre recursos genéticos (www.wormbase.org) y otro sobre imágenes (www.wormatlas.org). Estos esfuerzos de colaboración han

permitido enormes progresos para entender procesos celulares y moleculares con aplicación a la biomedicina y la evolución. Por ejemplo, *C. elegans* fue el primer animal del cual se obtuvo la secuencia completa de su genoma en 1988, y el primer mapa de conexiones neuronales completas en 2019. El estudio de esta especie ha contribuido decisivamente en disciplinas como la genética y la biología del desarrollo.

■ ■ ■ **Nemátodos y funcionamiento de los ecosistemas**

■ Los ecosistemas contribuyen al bienestar de la sociedad humana a través de servicios tales como el provisionamiento de combustibles y el reciclaje de nutrientes. Estos servicios son ecológicos por su naturaleza y dependen de componentes vivos de los ecosistemas, como microorganismos, hongos, ani-

males y plantas. Una pregunta pertinente es cómo los nemátodos influyen en procesos ecosistémicos esenciales para mantener la vida en el planeta. La respuesta se puede ilustrar con un ejemplo que muestra el efecto de la actividad de los nemátodos sobre el reciclaje de nutrientes y la descomposición de la materia orgánica en los sedimentos marinos (véase la **Figura 2**).

La fotosíntesis es un proceso esencial para la vida en la Tierra, pues a partir de la energía solar, y en presencia de agua y nutrientes, se genera carbono orgánico y oxígeno. El carbono orgánico sintetizado por el fitoplancton tiende a hundirse y se transforma en nutrientes durante su descenso en la columna de agua y acumulación en los sedimentos marinos. La descomposición de la materia orgánica es realizada fundamentalmente por microorganismos (bacterias,

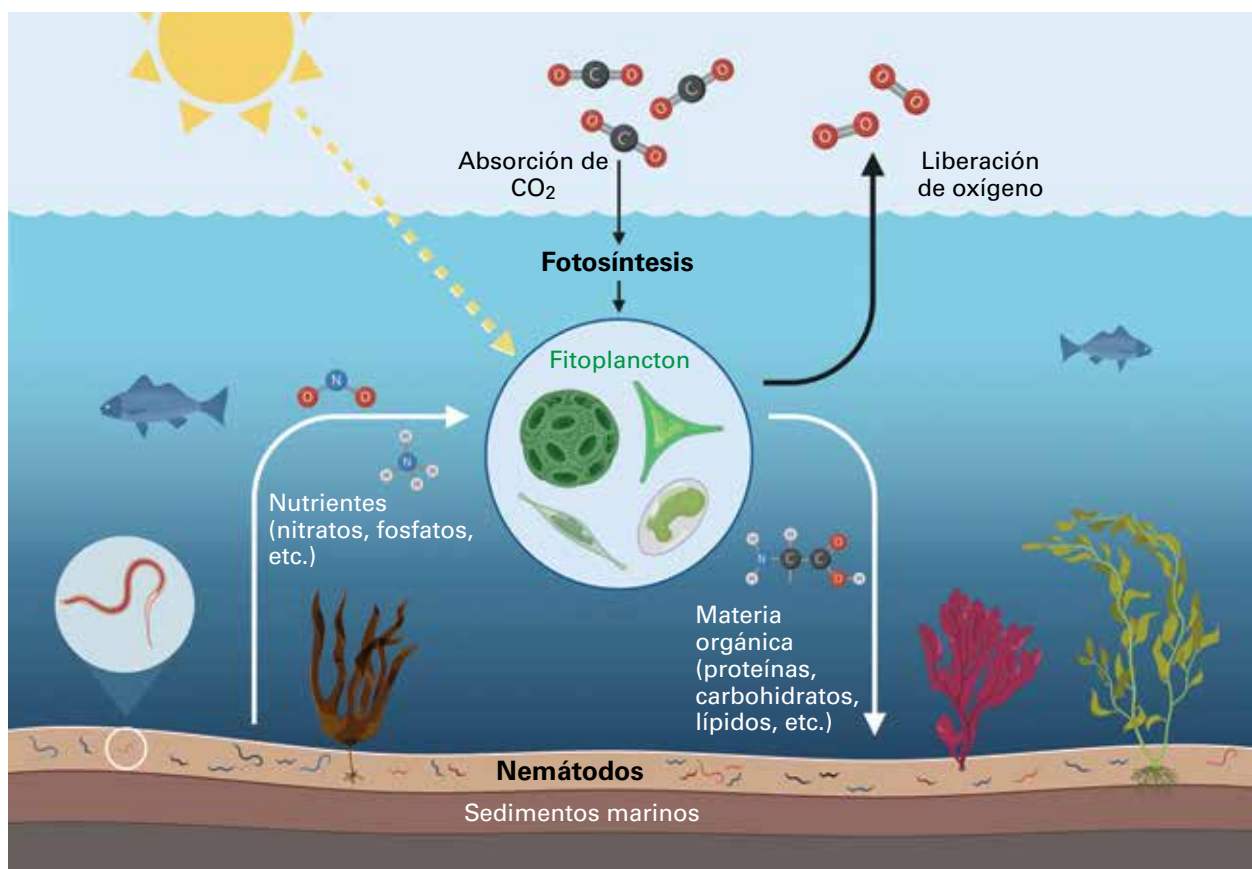


Figura 2. Esquema del proceso de reciclaje de nutrientes y descomposición de la materia orgánica en el océano costero. El carbono orgánico generado durante la fotosíntesis por el fitoplancton se transforma en nutrientes por la actividad de microorganismos del sedimento. Los nemátodos aceleran este proceso al consumir los microorganismos y excretar nutrientes. El reciclaje de nutrientes y descomposición de la materia orgánica afectan servicios ecosistémicos esenciales como la absorción de CO_2 de la atmósfera al océano y la producción de oxígeno por el fitoplancton. Creado con BioRender.com sobre una plantilla realizada por Ali Al Musawi y Gaia Lugano.

protistas y hongos) que cuentan con enzimas para convertir los compuestos complejos en nutrientes más simples. Sin embargo, los nemátodos aceleran la descomposición pues se alimentan de estos microorganismos manteniéndolos en una fase de crecimiento activo. Si no hubiese nemátodos, el proceso de descomposición sería mucho más lento y menos eficiente. Los nemátodos, por medio del movimiento dentro de los sedimentos, promueven la mezcla de partículas y la irrigación de sustancias como el oxígeno y nutrientes que son liberados nuevamente a la columna de agua, donde pueden ser empleados en el metabolismo del ecosistema.

El océano incluye extensas áreas de sedimentos donde los nemátodos constituyen más del 50 % de los animales, en el orden de millones por metro cuadrado de fondo; esto genera un efecto significativo sobre el funcionamiento de los ecosistemas. En el esquema mostrado en la **Figura 2** se ven dos flujos de alcance global que son esenciales para la vida en el planeta: la absorción de dióxido de carbono (CO₂) por parte del océano –un aspecto clave en la mitigación del cambio climático– y la liberación de oxígeno. Esta influencia de los nemátodos de vida libre en los procesos globales ilustra su importancia para la biosfera y para la sociedad humana.

Maickel Armenteros

Unidad Académica Mazatlán, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.
maickel_armenteros@ola.icmyl.unam.mx

Lecturas recomendadas

- Lee, D. L. (2002), *The Biology of Nematodes*, Londres, Taylor and Francis.
- Schmidt-Rhaesa, A. (ed.) (2014), *Handbook of Zoology. Gastrotricha, Cycloneuralia and Gnathifera*, vol. 2: Nematoda, Berlín, De Gruyter.
- Shatilovich, A., V. R. Gade, M. Pippel *et al.* (2023), “A novel nematode species from the Siberian permafrost shares adaptive mechanisms for cryptobiotic survival with *C. elegans* dauer larva”, *PLOS Genetics*, 19:e1010798. Disponible en: <https://doi.org/10.1371/journal.pgen.1010798>, consultado el 24 de abril de 2025.
- Shih, P.-Y., J. S. Lee, R. Shinya *et al.* (2019), “Newly identified nematodes from Mono Lake exhibit extreme arsenic resistance”, *Current Biology*, 29(19): 1-6. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.cub.2019.08.024>, consultado el 24 de abril de 2025.

Alonso Ortiz Luviano, Juan Fernando García Trejo y Claudia Gutiérrez Antonio

Destete eficiente, granjas porcícolas rentables

En la producción porcícola, los lechones (o pequeños cerditos) son vulnerables a todo tipo de factores que pueden afectar su desarrollo. Un momento clave es el destete, cuando ya no dependen de su madre para alimentarse y comienzan a consumir nuevas fuentes de alimento. Para los lechones esto representa un gran estrés, reflejado, entre muchos otros aspectos, en una disminución en el consumo de alimento.

Adicionado a esto, los alimentos no siempre son los adecuados de acuerdo con el desarrollo del sistema digestivo del cerdito, lo que puede ocasionar malnutrición y diarreas que pueden ser mortales en cerditos de sólo 21 días de vida. A nivel comercial se han implementado diferentes estrategias; sin embargo, no siempre son las más adecuadas para el bienestar del animal. Por lo anterior, en este artículo se comenta la importancia de realizar una buena transición en la etapa de destete de lechones, las nuevas tendencias para obtener un mejor desarrollo de éstos y las repercusiones o los beneficios que conlleva para los productores la realización de un destete adecuado.

Introducción

A nivel mundial, las principales carnes que se consumen son de origen bovino, porcino y avícola. En particular, México es el quinto país que más consume carne per cápita en el mundo, y ocupa el sexto lugar en la producción de proteína animal. Específicamente, México es el octavo país productor de carne de origen porcino, y ocupa el noveno lugar en su consumo. En 2022 se estimó un consumo en México per cápita de 20.9 kg de carne de cerdo, lo cual la hace la segunda carne más consumida después del pollo. La producción de carne de cerdo en México es de 1.6 millones de toneladas (Comecarne, 2022).

Ahora bien, la producción porcina tiene como principal objetivo la engorda de cerdos hasta los 100 kg para ser enviados a los rastros; el producto final es una canal con un rendimiento del 80-82 % del peso vivo del animal. Existen tres tipos de granjas. Las granjas productoras de lechones, las cuales se enfocan en el ciclo productivo de las cerdas, cumplen con una **etapa de cubrición**

Etapa de cubrición

Es la fase del ciclo reproductivo en la que ocurre la cópula entre el macho y la hembra con el objetivo de lograr la fecundación.



—en la cual son emparejadas con un macho—, así como de gestación y maternidad, cuando cuidarán de sus crías. Los lechones son vendidos a las granjas de engorda al cumplir 21-28 días de vida, con un peso promedio de 6-8 kg. Por otra parte, las granjas de engorda reciben a los lechones destetados, los cuales son alimentados según sus necesidades nutricionales y el grado de desarrollo. Los cerdos son engordados hasta alcanzar un peso vivo de 100-105 kg. Finalmente, las granjas de ciclo completo pueden contar, en una sola unidad de producción, con las hembras gestantes, las hembras de reemplazo, los lechones lactantes, lechones destetados y los cerdos en engorda. El ciclo completo de un cerdo de engorda es de aproximadamente 170 días (Rodríguez, 2015). En la producción de carne de cerdo el destete es una etapa crítica; un buen o mal destete se ve reflejado hasta en los últimos días en que los cerdos se encuentran dentro de la producción. Por ello, en el presente artículo se muestra la importancia y las consecuencias de un buen manejo del destete, así como las distintas estrategias para conseguir los rendimientos adecuados en la producción durante esta etapa.

¿Cómo es el destete en la naturaleza?

El destete es el proceso de transición gradual de una alimentación basada exclusivamente en leche materna a una alimentación sólida; en pocas palabras, en el destete la cría deja de depender de su madre como proveedora de nutrientes y comienza a obtener el alimento por su propia cuenta. El destete no sólo involucra cambios en el tipo de alimentación como tal, también hay cambios neuroendocrinos, desarrollo de estructuras celulares del sistema digestivo, producción y madurez de enzimas del sistema digestivo.

El destete empieza en la semana tres o cuatro de vida de los lechones, y puede durar en promedio hasta la semana 17. Revisemos cómo es este proceso.

Las cerdas suelen parir de 10 hasta 16 lechones, los cuales durante la primera semana de vida se mantendrán dentro de un nido, aislados de la manada; en dicho nido, éstos estarán bajo la protección y calor de la cerda todo el tiempo. Cada lechón elegirá una teta, de la cual mamará durante todo el periodo

de lactancia. Esta elección pareciera no tener efecto en la crianza; sin embargo, la posición de cada teta influye en la producción de leche, por lo que no todos los lechones recibirán la misma cantidad de leche y, por lo tanto, de nutrientes. Así, los lechones que maman de las tetas de menor producción iniciarán el proceso de destete antes que los lechones de mayor suministro lácteo.¹ A la primera porción de leche que la cerda produce se le llama calostro, el cual es rico en anticuerpos; el calostro es la primera “vacuna” que reciben los lechones al nacer, así como la fuente de nutrientes para el correcto desarrollo del tracto gastrointestinal de los lechones durante la primera semana. Durante las semanas dos y tres, los lechones siguen a la cerda para explorar nuevos sitios, lo cual los expone a ambientes y microorganismos diferentes que provocan el desarrollo de un sistema inmune un poco más completo. Hasta este momento, la nutrición de los lechones es completamente proporcionada por la leche materna, durante intervalos que van de 40 a 50 minutos.

En las próximas cuatro a siete semanas, los intervalos entre los periodos de lactancia serán cada vez mayores, pasando de una frecuencia de una vez cada hora a 4-6 veces por día, por lo que los lechones empiezan a buscar alimento sobre y debajo de la tierra. Debido a lo anterior se empieza a crear una microbiota más compleja y se desarrollan las secreciones enzimáticas para obtener y absorber nutrientes que no provienen de la leche materna.

En las semanas ocho hasta la 17, los lechones son completamente independientes de la cerda, ya no consumen leche e inician el consumo de una dieta sólida y compleja que mantendrán por el resto de su vida. Naturalmente, los cerdos son omnívoros: el 90 % de su dieta es herbívora, pues consumen en su mayoría frutas, vegetales y semillas, mientras que el 10 % restante de la dieta se conforma de insectos terrestres y gusanos (Brooks y Tsourgiannis, 2003).

Como se puede observar, el destete es un proceso gradual de una dieta exclusiva de leche materna a

¹ La razón es que los lechones que maman de las tetas de menor producción empiezan a buscar nutrientes en otras fuentes de alimento.

una variada y compleja. Esta transición permite el desarrollo del sistema inmune, la madurez del tracto gastrointestinal, así como el desarrollo de enzimas y de la microbiota intestinal. Dado que todos estos cambios son graduales, los lechones mantienen una tendencia de ganancia de peso. Ahora bien, dentro de la producción porcícola el proceso de destete es diferente, como se discute a continuación.

■ El destete en la producción

■ En la producción porcícola el destete es precoz. Aproximadamente entre el día 12 y 21 los lechones son separados abruptamente de la cerda para empezar a recibir un alimento sólido; este alimento intenta satisfacer las necesidades nutricionales de los lechones y tiene como objetivo alcanzar tasas de crecimiento máximas. Esto implica que los lechones experimenten en sólo un día todos los cambios de un proceso que de forma natural tomaría de ocho a 17 semanas. En el proceso de destete comercial, los lechones son alojados con individuos completamente extraños en un espacio nuevo y desconocido; además, su alimento es seco (80-90%), en forma de harina o *pellets*, para los cuales su sistema digestivo no está listo. Todos estos cambios ocasionan que los lechones presenten una interrupción en su desarrollo durante los primeros días del destete.

En la producción intensiva un destete tardío representa grandes costos. Esto se debe a que hay un menor número de camadas por cerda al año, así como un mayor riesgo de tener lechones enfermos al estar un mayor tiempo con animales adultos. Por ello, la estrategia que actualmente se utiliza en la porcicultura es tener un destete a los pocos días, entre los 14 y los 21 días, y tratar de mitigar los problemas mencionados con instalaciones altamente tecnificadas.

■ ¿Qué representa para el lechón y el productor un mal o buen manejo del destete?

■ Ya sabemos lo que sucede en el lechón durante el destete; sin embargo, también es importante visualizar el impacto que tiene un buen o un mal destete en la producción porcícola. Durante el destete comer-



cial los lechones pierden peso y la recuperación de éste durante los días de destete es de suma importancia para el productor; esto se debe a que la pérdida de peso afecta y se refleja hasta en la etapa final del cerdo en el proceso de producción. Una diferencia de 1.8 kg al momento del destete entre lechones se incrementa hasta 5 kg de diferencia después de 78 días, y después de 150 días puede llegar a 10 kg de peso vivo. Es decir, una diferencia de tan sólo 1.5 kg de peso al destete representa 8.6 días de diferencia para alcanzar los 105 kg de peso final para el cerdo (Wolter y Ellis, 2001); en una producción porcina, 8.6 días más para obtener el producto final involucra grandes gastos. Si logramos que los lechones mantengan su peso después de la primera semana posdestete, se espera que lleguen al peso final en 178 días; mientras que si éstos tienen una ganancia de peso diaria de al menos 115 g/d en la primera semana posdestete, se podrá reducir en 15 días el tiempo para alcanzar el peso final. En la primera semana posdestete, una diferencia de 0.9 kg de ganancia de peso se transforma en 12 kg de diferencia en el peso al momento del sacrificio.

■ La alimentación, el verdadero reto del destete

■ El consumo de los nutrientes necesarios durante el destete es muy importante. Un lechón con un crecimiento de 250 g/d, alimentado con leche materna, necesita consumir 200 g al día de materia seca proveniente de la leche. Sin embargo, al cambiar a un alimento seco necesitará al menos 300 g/d de alimento seco, lo anterior considerando que este alimento es alto en nutrientes.

Por lo antes expuesto, la dieta posdestete y los ingredientes dentro de ella son de suma importancia para los productores. Un lechón destetado a los 8 kg de peso necesita una ingesta de energía de 5.75 MJ/día. En la práctica, una buena dieta contiene aproximadamente 16 MJ/kg. Por lo que si se considera una ingesta de 220 g/día de alimento durante la primera semana después del destete se obtendrá un lechón cuyo consumo de energía es de 3.5 MJ/día; este consumo es equivalente a un 55 % del consumo de energía óptimo para la primera semana posdestete. Así, para alcanzar un desempeño óptimo de los lechones, los productores deben integrar una dieta con 23 MJ/kg, con lo cual los lechones deberían tener un consumo de alimento de 400 g/día. La obtención de estos rendimientos no es viable desde el punto de vista económico para los productores.

■ Ingredientes alternativos en la alimentación posdestete

■ Hemos observado que la alimentación antes, durante y después del destete tiene una gran importan-

cia para los productores, por lo que se debe contar con un alimento que provea el mayor aporte de energía posible en la dieta, con ingredientes altamente digestibles y con el menor costo posible.

Así, durante mucho tiempo la harina de soya ha sido uno de los ingredientes principales en las dietas para lechones, ya que cumple con las tres características mencionadas. No obstante, la soya está compuesta por proteínas que provocan un efecto de hipersensibilidad en los lechones y que se presenta principalmente en forma de diarreas; por ello, su uso está restringido, sobre todo en la etapa de lechón, ya que el desarrollo dentro del sistema digestivo todavía no está completo, lo que hace incapaz al lechón de digerir algunos componentes complejos. A pesar de esto, en la práctica se sigue utilizando la soya como principal fuente de proteína en las dietas de lechones. Debido a ello, la tendencia es sustituir o complementar la soya dentro de las dietas con ingredientes diferentes que cumplan con los tres aspectos de una buena dieta (aporte energético alto, fácil digestibilidad y bajo costo). En este contexto, algunos ingredientes nuevos que se han empleado incluyen concentrado de suero lácteo, plasma animal, harina de pescado de alta calidad, proteína de huevo, proteína de papa, extracto de gluten de trigo, proteína de insectos, proteína de microalgas, aditivos como ácidos grasos de cadena corta, enzimas, prebióticos y probióticos (Lawlor y cols., 2020).

Los hidrolizados de proteínas son producidos ya sea mediante un proceso químico, microbiológico o enzimático en donde se eliminan algunos de los factores antinutricionales que se puedan encontrar en las harinas completas. Las proteínas hidrolizadas son de alta absorción para el intestino delgado, en comparación con las proteínas en estado completo. Entre las proteínas hidrolizadas más utilizadas en la alimentación de cerdos se encuentran las vísceras de salmón, intestinos de porcinos, plasma porcino y proteína de soya.

Otro ingrediente de interés es la harina de insectos como fuente de proteína de alta calidad. La adición de este tipo de harinas es una de las nuevas estrategias utilizadas en la alimentación para lechones, debido a su alto contenido de proteína, que va desde

MJ

Megajulio: medida de energía, trabajo o calor, dependiendo del contexto. Un julio es la energía necesaria para aplicar una fuerza de un newton en un metro de distancia.



un 30 hasta un 75 %, un buen perfil de aminoácidos y una buena digestibilidad de hasta 93 %, lo que las posiciona como un posible reemplazo parcial o total de la harina de soya o la harina de pescado en la alimentación de cerdos (Van Krimpen y Hendriks, 2019). La producción de este tipo de harina es potencialmente una fuente de proteína más amigable con el medio ambiente que las harinas actuales, ya que los insectos pueden ser alimentados con desperdicios de diferentes industrias agrícolas, lo que lo hace atractivo para los productores porcícolas, pues constituye una alternativa para reducir la contaminación y los recursos dentro de la producción porcícola sin afectar el rendimiento de los animales.

■ Conclusiones

■ El consumo de carne seguirá en aumento, de modo que la capacidad de producción de este sector debe crecer. Sin embargo, la alta demanda de este producto no justifica dejar a un lado el bienestar animal ni tampoco los beneficios económicos para los productores. Por ello, las tendencias actuales y los avances tecnológicos y de investigación van dirigidos a generar alimentos que permitan nutrir de manera adecuada a los animales, considerando al mismo tiempo el impacto en el medio ambiente. Dentro de la porcicultura las estrategias se dirigen a buscar un buen manejo del lechón en el destete, así como una adecuada alimentación durante esta etapa.

Alonso Ortiz Luviano

Universidad Autónoma de Querétaro.
aortizluviano@gmail.com

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.
fernando.garcia@uaq.mx

Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.
claudia.gutierrez@uaq.mx

Lecturas recomendadas

- Brooks, P. H. y C. A. Tsourgiannis (2003), "Factors affecting the voluntary feed intake of the weaned pig", en J. R. Pluske, J. Le Dividich y M. W. A. Verstegen (eds.), *Weaning the Pig, Concepts and Consequences*, Países Bajos, Wageningen Academic Publishers, pp. 81-116.
- Comecarne (2022), "Compendio estadístico 2021", *Consejo Mexicano de la Carne* [en línea], p. 108. Disponible en: <<https://comecarne.org/compendio-estadistico-2021/>>, consultado el 9 de mayo de 2025.
- Lawlor, P. G., G. E. Gardiner y R. D. Goodband (2020), "10. Feeding the weaned piglet", en C. Farmer (ed.), *The Suckling and Weaned Piglet*, Países Bajos, Wageningen Academic Publishers, pp. 251-275.
- Rodríguez González, E. (2015), *Cuidados en cerdas de reemplazo, reproductoras y lechones*, España, IC Editorial.
- Van Krimpen, M. M. y W. H. Hendriks (2019), "13. Novel protein sources in animal nutrition: considerations and examples", en W. H. Hendriks, M. W. Verstegen y L. Babinszky (eds.), *Poultry and pig nutrition. Challenges of the 21st century*, Países Bajos, Wageningen Academic Publishers, pp. 279-305.
- Wolter, B. F. y M. Ellis (2001), "The effects of weaning weight and rate of growth immediately after weaning on subsequent pig growth performance and carcass characteristics", *Canadian Journal of Animal Science*, 81(3):363-369.



Daniela Yaxhá Juárez Peña y Gilberto Ballesteros Rodea

Transmisión de toxoplasmosis entre gatos y humanos

La toxoplasmosis es una zoonosis producida por *Toxoplasma gondii*, en la que el gato es el huésped definitivo y es capaz de excretar la forma infectante del parásito, de modo que resulta de importancia para la salud pública a nivel global, ya que produce cuadros clínicos serios en ciertos grupos humanos.

Parásito intracelular obligado

Aquel que para completar su ciclo de vida necesita invadir y permanecer dentro de células del hospedero.

Introducción

El *Toxoplasma gondii* es un **parásito intracelular obligado** y la enfermedad que produce, la toxoplasmosis, es una zoonosis ampliamente distribuida; por ello se le considera el parásito eucariota más exitoso a nivel global. Actualmente, el *Toxoplasma gondii* es de interés para la salud pública, pues se estima que un tercio de la población humana está infectada con el parásito. Además, la toxoplasmosis tiene varias fuentes de transmisión y el parásito muestra diferentes etapas de desarrollo que pueden ser infectivas. Una de las más importantes se da dentro de su huésped definitivo: el gato.

Historia

A principios del siglo pasado, en 1908, el agente causal de la toxoplasmosis, *Toxoplasma gondii*, fue descubierto gracias a Charles Nicolle y Louis Manceux, quienes encontraron el parásito mientras examinaban órganos del gundi, un roedor norafricano; para nombrarlo, se basaron en la forma arqueada en la que lo encontraron. Por ello, usaron el griego *toxon*, que significa arco. Simultáneamente, Splendore, en Brasil, también lo descubrió, pero esta vez en el conejo. Posteriormente, en 1937 se reportó la toxoplasmosis humana en un bebé con encefalomiелitis. De esta forma se supo que en algunas poblaciones la enfermedad causaba un cuadro clínico importante y finalmente se relacionó la enfermedad congénita con *Toxoplasma gondii*.

En la década de 1950, se encontró que la infección por *Toxoplasma gondii* también podía estar relacionada con enfermedades inflamatorias del ojo, reconociendo así a la toxoplasmosis en su presentación clínica ocular. Con el incremento del



número de casos sospechosos, se buscó una prueba diagnóstica que se pudiera implementar en la población, y en 1948 se desarrolló la prueba del colorante Sabin-Feldman.

En los años posteriores, los investigadores comenzaron a preguntarse sobre el mecanismo por el cual los humanos y los animales quedaban infectados, y en 1965 Desmonts y colaboradores confirmaron el papel del consumo de la carne cruda o poco cocida como mecanismo de transmisión de *Toxoplasma gondii*. Pero aún quedaba por explicar la alta incidencia de la infección en herbívoros o humanos vegetarianos. Debía de haber un mecanismo de transmisión alternativo. Así fue como se encontró una forma del parásito aislada en las heces de los gatos (huésped definitivo). Con estos hallazgos se logró descubrir el ciclo de vida completo de *Toxoplasma gondii*. En 1970, con la aparición de la epidemia del síndrome de inmunodeficiencia adquirida (SIDA), la toxoplasmosis comenzó a ser una enfermedad oportunista significativa y se le dio más importancia en la salud pública. Veinte años después se inició el estudio del genoma de *Toxoplasma gondii* por medio de técnicas de biología molecular y, gracias a esto, se estableció la existencia de tres linajes clonales (tipo I, II y III). Finalmente, a inicios del milenio, se hicieron los primeros estudios donde se demostró que la infección, al afectar el sistema nervioso, disminuía el miedo del ratón (huésped intermediario) a ser depredado por el gato (huésped definitivo). Durante los siguientes años y hasta la fecha, se pueden encontrar muchas otras investigaciones acerca de la biología del parásito y su relación con la célula huésped (Ferguson, 2009).

■ **Morfología**

■ Con este conocimiento alcanzado a lo largo del tiempo, se sabe que *T. gondii* presenta tres formas infectivas:

- El taquizoíto, que representa una etapa del parásito, tiene forma de media luna y este nombre se le dio debido a que se multiplica de forma rápida. Tiene un extremo anterior puntiagudo y uno posterior redondeado. Para diferenciarlo, el núcleo está en el área central de la célula (véase la **Figura 1A**).
- Los bradizoítos representan la fase de multiplicación lenta, razón por la cual se les denominó así. Se desarrollan dentro del quiste tisular, que es una estructura intracelular que los engloba y tiene la capacidad de desarrollarse en cualquier órgano (véase la **Figura 1B**).
- Por último, están los ooquistes, que son las formas de resistencia infectivas del parásito. Se les puede encontrar no esporulados (inmaduros), que son esféricos y tienen un núcleo prominente, o esporulados (maduros), que son elipsoidales y dentro de ellos están los esporozoítos (véase la **Figura 1C**).

■ **Ciclo de vida**

■ El compañero felino del humano, el gato, es el huésped definitivo –así como varios miembros de la familia *Felidae*–, y cuando éste ingiere una forma infectiva, ésta comienza su tránsito por el sistema digestivo hasta que llega al estómago, donde las enzimas van a disolver la pared de los quistes, de modo que los bradizoítos o los esporozoítos serán liberados, podrán adherirse y penetrar las células epiteliales del

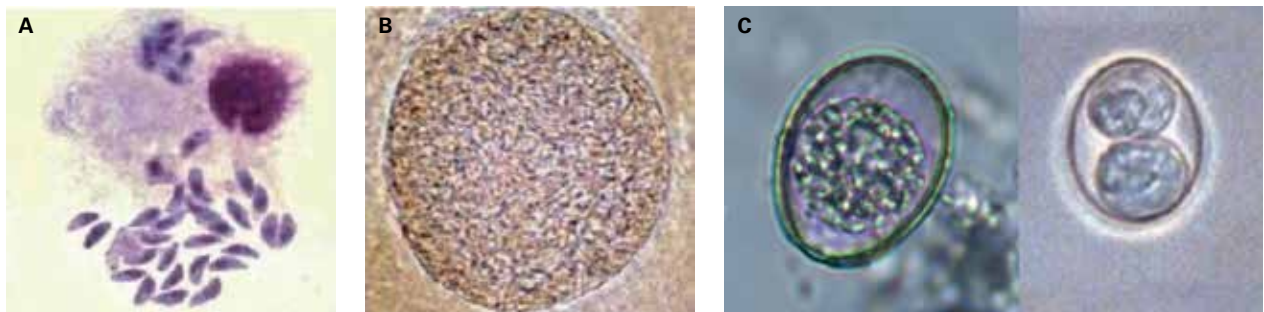


Figura 1. **A.** Macrófago pulmonar y taquizoítos de *Toxoplasma gondii* de un gato infectado (tinción de Giemsa). **B.** Quiste de *Toxoplasma gondii* en cerebro de ratón. Es una preparación temporal 111Q. **C.** Ooquistes de *Toxoplasma gondii* sin esporular (izquierda) y esporulados (derecha). Fuente: D. D. Bowman y J. R. Georgi (2009), *Georgis' Parasitology for Veterinarians*, EUA, Elsevier.

intestino. Después de sucesivas divisiones van a provocar la ruptura de la célula intestinal (enterocito), para liberarse e infectar a otros enterocitos. Así, algunos comenzarán a diferenciarse en gametos que, al encontrarse unos con otros, van a formar el ooquiste inmaduro (no esporulado) y éstos serán liberados en las heces del gato, de modo que, con el ambiente adecuado, van a madurar (esporular). El parásito, al desarrollar la forma asexual en el gato, da lugar a la forma crónica de la infección.

En los huéspedes intermediarios (los cuales incluyen humanos, animales domésticos y silvestres), *T. gondii* sólo tiene reproducción asexual. Los hospederos se infectan y, una vez ingeridas las formas infectantes –nuevamente, gracias a las enzimas del estómago–, se van a liberar y, con ello, van a penetrar el epitelio intestinal, donde se reproducirán y posteriormente transformarán en taquizoítos que se diseminan por vía sanguínea o linfática, donde pueden parasitar casi cualquier célula y, al hacerlo, se volverán a

multiplicar dentro de ella y formarán un quiste tisular que con el tiempo se rompe, repitiéndose el ciclo, según la inmunidad del huésped (véase la [Figura 4](#)).

■ Prevalencia

■ La toxoplasmosis se ha reportado en todos los continentes. Varios países han reportado que más del 60 % de su población está infectada con *T. gondii*. Gracias a un metaanálisis de reportes a nivel global, se resalta que hay diversos factores ambientales, socioeconómicos y culturales que pueden modificar las tasas de prevalencia en animales y humanos. En otros estudios, donde se observa la prevalencia en gatos, se concluye que el grado de domesticación también influye en las tasas de infección, de modo que los gatos domesticados presentan menor prevalencia, en comparación con gatos semidomesticados.

En la población mexicana de humanos, la seroprevalencia varía entre 15 y 50 % y se ha estudiado

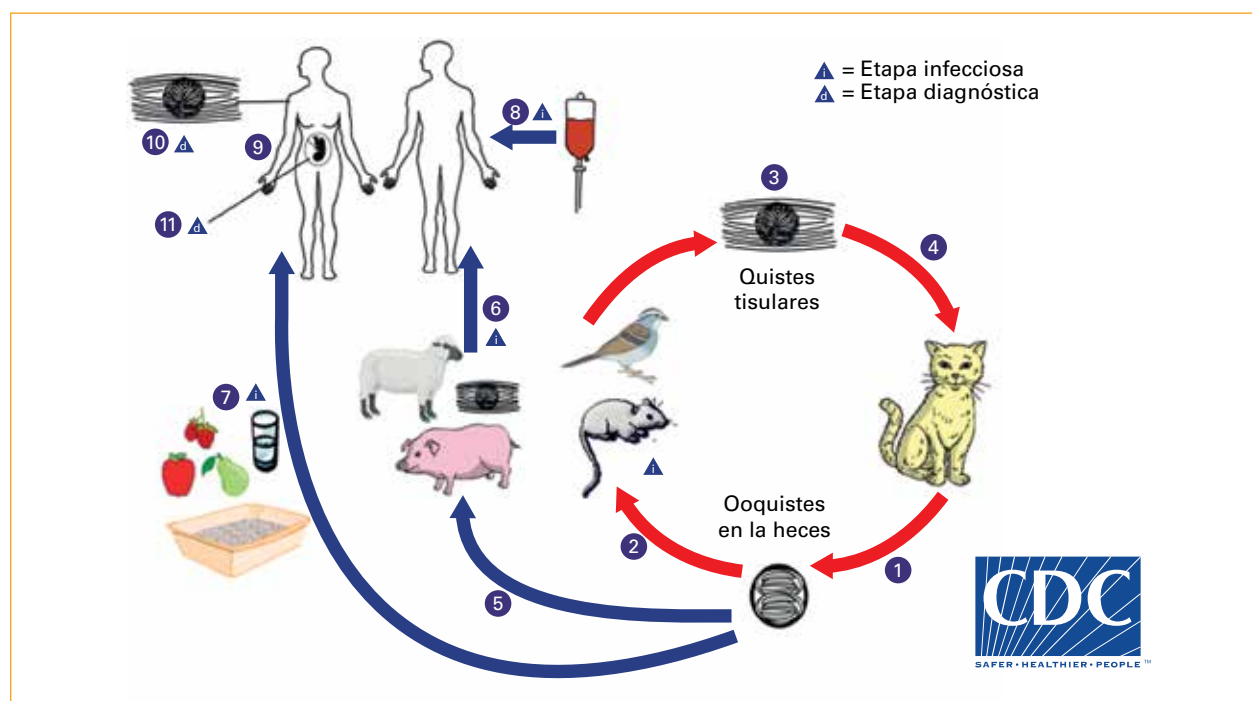


Figura 4. Ciclo de vida de *Toxoplasma gondii*. 1) Los ooquistes se eliminan en las heces del gato. 2) Los ooquistes esporulan (maduran) y se vuelven infecciosos. Los huéspedes intermediarios se infectan después de ingerirlos. 3) Se desarrolla el cuadro clínico crónico, con quistes tisulares en el huésped. 4) Los gatos se infectan después de consumir huéspedes intermediarios con quistes tisulares. 5) Los animales criados para el consumo humano pueden infectarse consumiendo las formas infectantes. 6) Los seres humanos pueden infectarse por comer carne cruda o poco cocida. 7) También pueden infectarse por consumir alimentos o agua contaminados de heces de gato o por contacto con la caja de arena de gato. 8) Por transfusión de sangre o trasplante de órganos. 9) Por transmisión transplacentaria, de la madre al feto. 10) En los seres humanos los parásitos forman quistes tisulares. 11) Las infecciones congénitas se pueden diagnosticar mediante la detección de ADN en el líquido amniótico. Fuente: Centros para el Control y la Prevención de Enfermedades (CDC-DPDX).

que hay mayor prevalencia en las zonas costeras (64 %), en comparación con las regiones áridas (13 %). En estudios realizados en animales, se ha reportado la prevalencia de *T. gondii* en gatos de Durango (21 %), de Ciudad de México (21.8 %) y de Colima (28.8 %). Comparando los resultados, la prevalencia más alta se encontró en Yucatán, con 91.8 %. Estos estudios muestran que la presencia del parásito es muy variada y depende tanto de la zona geográfica como de los hábitos de los animales, entre otros factores.

Transmisión

 Para disminuir las zonas de prevalencia, tanto en seres humanos como en animales en estrecho contacto con ellos, es importante conocer la forma de transmisión, la cual se da principalmente por contacto directo. En gatos se piensa que la ruta más probable de infección es el consumo de carne cruda o poco cocida que contiene las formas infectivas del parásito. También los seres humanos pueden ser infectados por esta vía. La infección se puede dar por la ingestión de ooquistes maduros (esporulados) provenientes de fuentes diversas como tierra, arena para gato, alimentos vegetales e incluso agua contaminada. Se ha demostrado que atraviesan la barrera placentaria en especies como los seres humanos, ovejas, cabras, camellos y ganado (Stelzer y cols., 2019). También se ha demostrado que los insectos pueden actuar como vectores mecánicos. Y finalmente, algunos pescados, moluscos y ostras pueden concentrar el parásito y transmitirlo a mamíferos marinos u otras especies que los consuman.

Signos

 En los animales la mayoría de las infecciones son asintomáticas. En el gato, los casos graves de toxoplasmosis ocurren en especímenes inmunocomprometidos y de edad avanzada, cuyos signos son principalmente inespecíficos, como letargia, fiebre y anorexia, aunque también se han observado signos respiratorios y neurológicos. En hembras gestantes que contraen por primera vez la infección, se observan cachorros deformes, abortos o partos pre-

maturos. Es muy común que haya signos oculares. Por otro lado, en seres humanos los síntomas no se presentan en individuos inmunocompetentes. En adolescentes y adultos jóvenes se desarrolla la toxoplasmosis ocular. En pacientes inmunosuprimidos y con gestación, se presentan síntomas como dolor de cabeza persistente, lesiones oculares y lesiones en corazón y pulmones. Hay pacientes que pueden llegar a necesitar cuidados intensivos. Finalmente, en el resto del amplio abanico de huéspedes intermediarios del toxoplasma, los signos son semejantes a los ya mencionados, con pérdidas reproductivas, muerte de animales viejos y signos no específicos.

Lesiones

 Las lesiones se asocian al movimiento del parásito a través del huésped. La ruptura de un quiste tisular liberará cientos de bradizoítos que, por defecto, se convertirán en taquizoítos, los cuales experimentan una rápida proliferación en ausencia de una respuesta inmune efectiva, lo que resulta en la destrucción progresiva del tejido del huésped (lesiones necróticas) y diseminación sistémica.

Diagnóstico

-  Actualmente se usan métodos directos e indirectos para detectar al parásito.
-  Indirectos: detección de anticuerpos específicos en excreciones y líquidos corporales. Se usa la prueba de Sabin-Feldman, la inmunofluorescencia indirecta y el ensayo inmunoabsorbente ligado a una enzima (ELISA).
-  Directos: muestran la presencia del parásito en los tejidos, excreciones y líquidos corporales. Entre estos métodos está la histopatología, junto con la inmunohistoquímica; también se usa el método de reacción en cadena de la polimerasa (PCR) y el aislamiento por inoculación en ratones.

Además, en los gatos, las infecciones también pueden diagnosticarse por flotación fecal de ooquistes, así como mediante la observación de taquizoítos en

frotis de aspirados traqueales, secreciones torácicas o peritoneales.

■ Prevención

■ En cuestión de prevención, se deben implementar esfuerzos orientados a la educación, sobre todo dirigida a los propietarios de gatos, que fomente la higiene en la manipulación y preparación de alimentos; la limpieza de las cajas de arena, la cual se debe hacer a diario para evitar la esporulación (maduración) del ooquiste; no alimentarlos con comida cruda y evitar la caza y consumo de huéspedes intermediarios, como ratones, o impedir que se expongan a vectores mecánicos como las cucarachas –esto se puede evitar no permitiendo a los gatos salir al exterior–. Otra medida de suma importancia para la prevención es la desparasitación periódica del gato, de preferencia comprobando la presencia del parásito mediante un examen coproparasitológico. Además, los individuos en riesgo de presentar el cuadro clínico grave deberían evitar estar en contacto con la arena para gatos y, en caso de tener que hacerlo, usar guantes.

■ Tratamiento

■ Hoy en día no existe un tratamiento eficaz para la infección latente por *T. gondii*. Los tratamientos para enfermedades agudas y aquellos que se utilizan para evitar la transmisión de la madre al hijo (transmisión vertical) son imperfectos. Para la toxoplasmosis ocular en humanos, se hace uso de antibióticos orales con corticosteroides sistémicos; también hay evidencia de que podrían usarse antibióticos intravítreos. Cuando hay infección en un animal, ya sea el gato u otro huésped intermediario susceptible, el tratamiento es a base de antibióticos. Los corticosteroides se pueden usar cuando se presenta la infección ocular para reducir la inflamación, y también se recomienda el uso de terapia de soporte.

■ Conclusión

■ La toxoplasmosis es una enfermedad muy extendida entre las poblaciones animales y humanas que,

ciertamente, tiene un impacto socioeconómico y de salud pública negativo. Por ello, es importante usar la información con la que se cuenta para implementar medidas de prevención y control, sobre todo en aquellas poblaciones susceptibles; además de prevenir la infección en los animales de compañía, que a su vez son el huésped definitivo: los gatos.

Daniela Yaxhá Juárez Peña

Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

danielle_juarez.p@hotmail.com

Gilberto Ballesteros Rodea

Facultad de Agronomía y Veterinaria de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

gilberto.ballesteros@uaslp.mx

Lecturas recomendadas

Djurković-Djaković, O., J. Dupouy-Camet, J. Van der Giessen y J. P. Dubey (2019), “Toxoplasmosis: Overview from a one health perspective”, *Food and Waterborne Parasitology*, 15:e00054. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.fawpar.2019.e00054>>, consultado el 3 de abril de 2025.

Ferguson, D. J. P. (2009), “*Toxoplasma gondii*: 1908-2008, homage to Nicolle, Manceaux and Splendore”, *Memorias Do Instituto Oswaldo Cruz*, 104(2): 133-148. Disponible en: <<https://doi.org/10.1590/s0074-02762009000200003>>, consultado el 3 de abril de 2025.

Kalogeropoulos, D., H. Sakkas, B. Mohammed *et al.* (2021), “Ocular toxoplasmosis: A review of the current diagnostic and therapeutic approaches”, *International Ophthalmology*, 42(1):295-321. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10792-021-01994-9>>, consultado el 3 de abril de 2025.

Milne, G., J. P. Webster y M. Walker (2020), “*Toxoplasma gondii*: An underestimated threat”, *Trends in Parasitology*, 36(12):959-969. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.pt.2020.08.005>>, consultado el 3 de abril de 2025.

Stelzer, S., W. Basso, J. Benavides Silván, L. M. Ortega-Mora, P. Maksimov *et al.* (2019), “*Toxoplasma gondii* infection and toxoplasmosis in farm animals: Risk factors and economic impact”, *Food and Waterborne Parasitology*, 15:e00037. Disponible en: <<https://doi.org/10.1016/j.fawpar.2019.e00037>>, consultado el 3 de abril de 2025.

La hipertensión: ¿monoterapia o terapia combinada?

La monoterapia ha sido por muchos años el tratamiento de primera línea para la hipertensión arterial; sin embargo, su eficacia ha sido variable. En los últimos años se ha comprobado que la terapia combinada es más funcional. Recientemente, la terapia cuádruple o *quadpill* ha emergido como una terapia prometedora al mantener un control de la presión arterial a corto y largo plazo usando dosis bajas.

Hipertensión arterial

La hipertensión, conocida comúnmente como presión arterial alta, es una condición médica crónica que afecta a millones de personas en todo el mundo. Se caracteriza por un incremento de la presión arterial en las arterias, lo que puede provocar una serie de problemas de salud graves, como enfermedades cardiovasculares, accidentes cerebrovasculares y daño renal (Gorostidi y De la Sierra, 2013; Velasco y McDermott, 2010). Según informes de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2019), la hipertensión afecta a uno de cada cuatro hombres y a una de cada cinco mujeres, con un total de más de mil millones de personas afectadas, representando uno de los principales factores de muerte temprana y discapacidad a nivel mundial (Ramos, 2019; Rosas y cols., 2020).

Origen y clasificación de la hipertensión

Por muchos años la hipertensión ha sido una problemática sanitaria a nivel mundial. Según su etiología, esta enfermedad puede ser primaria o secundaria. La hipertensión primaria se refiere a una condición médica provocada por un origen desconocido, mientras que la hipertensión secundaria es el resultado de un problema de origen médico. Entre estos dos tipos de hipertensión, la más común es la hipertensión primaria, la cual afecta a alrededor del 90 % de las personas que padecen esta enfermedad (Velasco y McDermott, 2010). Como se mencionó, su origen es complejo y es prácticamente el resultado de un proceso multifactorial que se ha relacionado con el estilo de vida, incluyendo la falta de ejercicio y la mala alimentación.



Tabla 1. Clasificación de la hipertensión arterial según la American Heart Association.

Clasificación	Presión arterial sistólica (mmHg)	Presión arterial diastólica (mmHg)
Normal	Menos de 120	Menos de 80
Elevada	120-129	Menos de 80
Hipertensión etapa 1	130-139	80-89
Hipertensión etapa 2	140	90 o más alta
Hipertensión etapa 3	Más alta de 180	Más alta de 120

Presión arterial sistólica
Presión arterial cuando el corazón se contrae.

Presión arterial diastólica
Presión arterial cuando el corazón se relaja.

La American Heart Association ha definido tres tipos de hipertensión según la etapa en la que se encuentra (Tabla 1). Por otro lado, Yang y cols. (2025) la clasifican en tres niveles: 1) hipertensión leve, cuando hay una **presión arterial sistólica** de 140 a 159 mmHg o una **presión arterial diastólica** de 90 a 99 mmHg; 2) hipertensión moderada, cuando hay una presión sistólica de 160 a 179 mmHg o una presión diastólica de 100 a 109 mmHg, y la 3) hipertensión grave, cuando hay una presión sistólica superior a 180 mmHg y una presión diastólica superior a 110 mmHg. Estas clasificaciones son muy importantes, ya que están diseñadas para mejorar la prevención y el manejo de enfermedades cardiovasculares.

Antihipertensivo
Medicamentos utilizados para el tratamiento de la hipertensión.

■ Tratamientos actuales para la hipertensión
■ La primera línea de defensa en el tratamiento de la hipertensión comienza, en muchos casos, con una modificación en el estilo de vida del paciente. Entre las principales recomendaciones se encuentran la adopción de una dieta saludable, también denominada dieta DASH (siglas en inglés para *dietary approaches to stop hypertension*). Otras de las recomendaciones son el ejercicio regular, la reducción de peso, una limitación en la ingesta de alcohol y cafeína, así como la abstención en el consumo de tabaco. Sin embargo, cuando los cambios en el estilo de vida no son suficientes para controlar la hipertensión en el paciente, el médico suele recurrir a un tratamiento con medicamentos que permiten controlar la hipertensión y reducir el riesgo de complicaciones. Las estrategias terapéuticas para el manejo de la hipertensión han llevado al surgimiento de dos tipos de terapia. La primera de ellas se define como monoterapia, en la cual se administra un solo

medicamento para tratar la hipertensión. La segunda, y de relevancia actual, es la terapia combinada como formulación farmacéutica, la cual incluye la administración de más de un fármaco.

La disminución de la presión arterial sigue siendo un reto, pues de todas las personas que se someten a tratamiento para descender su presión arterial, sólo el 35 % logra disminuirla. Este bajo porcentaje de eficiencia se asocia con una mala administración de la dosis por parte del médico, falta de uso de más fármacos o un mal seguimiento por parte del paciente (Ramos, 2019).

■ Monoterapia: el primer enfoque para el tratamiento de la hipertensión
■ Por muchos años la monoterapia ha sido el punto de partida en el tratamiento de la hipertensión. Esta estrategia implica la administración de un solo medicamento **antihipertensivo** en pacientes con hipertensión leve a moderada. Diferentes grupos de fármacos han sido utilizados para este fin, incluyendo los inhibidores de la enzima convertidora de angiotensina, antagonistas de los receptores de angiotensina II, betabloqueadores, bloqueadores de los canales de calcio y diuréticos (Ramos, 2019). En esta terapia la comodidad del paciente ha sido un factor denominador, primero, para que el paciente no tenga que tomar múltiples medicamentos y, segundo, para que tenga menos efectos secundarios (Sabio y cols., 2019). A pesar de que la monoterapia ha sido una estrategia comúnmente utilizada para el tratamiento inicial de la hipertensión, su eficacia es baja, ya que reduce la presión arterial en aproximadamente 9/5 mmHg (Chow y cols., 2017). Además, muchos pacientes no alcanzan a obtener un control



adecuado de la presión arterial, lo que hace necesario intensificar el tratamiento. Una de las causas de esta ineficacia ha sido una respuesta insuficiente a parte del tratamiento, especialmente cuando la hipertensión es moderada o grave. Otra causa se ha asociado con una resistencia en parte del tratamiento a medida que la enfermedad progresa como resultado de la activación de sistemas de compensación (Gorostidi y De la Sierra, 2013).

■ **Sistemas de compensación: un combate silencioso entre el cuerpo y la hipertensión**

■ Un sistema de compensación es aquel que tiene la finalidad de mantener el equilibrio y la estabilidad interna del cuerpo; en otras palabras, el cuerpo intenta arreglar las cosas cuando algo cambia, aunque a veces no se obtenga un beneficio. En la hiper-

tensión, estos sistemas de compensación se activan de manera natural y ocasionan que poco a poco el fármaco pierda su efecto. Enseguida se muestra un ejemplo de un sistema de compensación por la administración de un diurético.

Te estarás preguntando ¿qué es un diurético? Un diurético es un medicamento que ayuda a eliminar el exceso de agua y sal del cuerpo a través de la orina. Ahora, ¿qué pasa cuando una persona consume un diurético?, ¿qué es lo que sucede dentro del cuerpo? La respuesta es fácil: lo que hace este fármaco es que los riñones eliminen más sal, es decir, excretan sodio, y cuando se excreta sodio, también se elimina agua. Cuando se reduce la cantidad de líquido en el cuerpo, el volumen de sangre disminuye. ¿Y qué pasa ahora? Imagina que tus arterias son como una manguera de jardín. Si tienes mucha agua (o volumen de sangre) fluyendo por la manguera, la presión den-

tro de la manguera será alta. Pero si reduces la cantidad de agua que pasa a través de la manguera, la presión será baja.

Ahora bien, cuando tomas un diurético es como si estuvieras eliminando un poco del volumen sanguíneo de la manguera, y al haber menos volumen en las arterias, la presión arterial baja. Aunque suene ilógico, el cuerpo piensa que en su estado hipertenso está funcionando “bien” y está en “equilibrio”. Después de la toma de un diurético el cuerpo se da cuenta de que algo cambió y activa sistemas de compensación para intentar volver al equilibrio. Sin embargo, si los diuréticos se consumen a largo plazo, los sistemas compensatorios buscan adaptarse a esos cambios. Esto significa que a veces puede haber un ajuste en cómo funcionan los riñones o en la producción de hormonas que regulan el agua y los electrolitos. Si el cuerpo empieza a retener más agua y sal, eso puede hacer que el volumen de sangre vuelva a aumentar y con ello la presión de las arterias, resultando en un estado hipertenso.

■ **Terapia combinada como formulación farmacéutica**

■ La terapia combinada se refiere al uso de dos o más medicamentos antihipertensivos diferentes, que se combinan para contrarrestar los mecanismos

que contribuyen al aumento de la presión arterial. Esta estrategia se ha utilizado principalmente en pacientes con hipertensión moderada a grave o en pacientes que no responden adecuadamente a una monoterapia. Esta terapia ha ganado popularidad ya que se ha evidenciado una mejoría más notoria en pacientes hipertensos en comparación con la monoterapia. Por ejemplo, un estudio realizado por Velasco y cols. (2010) comparó el uso de monoterapia y terapia combinada como formulación farmacéutica. Los resultados evidenciaron una disminución de la presión arterial en el 75 % del total de los pacientes, del cual el 68 % estaba tratado con terapia combinada, mientras que sólo el 6 % estuvo bajo la administración de monoterapia. En otro estudio, también se encontró que la combinación inicial de losartán e hidroclorotiazida fue más eficaz al reducir la presión sistólica (19 mmHg), en comparación con la monoterapia con losartán o hidroclorotiazida (11 mmHg) (McDonald y cols., 2017).

■ **Requerimientos básicos para el uso de la terapia combinada como formulación farmacéutica**

■ Diferentes estudios recomiendan la terapia combinada según sea el caso. Primero, para aquellos pacientes que presenten una presión arterial mayor o igual a 160/100 mmHg. Segundo, para los pacientes con una presión arterial mayor o igual a 140/90 mmHg, siempre y cuando presenten alto riesgo de padecer algún tipo de enfermedad metabólica, como la diabetes. Tercero, para aquellos pacientes con valores de presión elevada que necesiten disminuir su presión arterial 20 mmHg. Cuarto, si el paciente presenta una elevación de 20 mmHg en la presión sistólica, y de 10 mmHg en la presión diastólica (Ramos, 2019; Rosas y cols., 2020; Sabio y cols., 2019; Velasco y McDermott, 2010).

■ **Quadpill: una nueva frontera para el tratamiento de la hipertensión**

■ En los últimos años dentro de la terapia combinada ha resurgido la terapia cuádruple, o *quadpill*, una estrategia más intensiva que utiliza cuatro medica-



Tabla 2. Terapias utilizadas para el tratamiento de la hipertensión.

Participantes	Terapia	Monoterapia	Terapia combinada	País	Resultados	Referencias
591	<i>Quadpill</i> vs. monoterapia	Irbesartán 150 mg	Irbesartán 37.5 mg, amlodipino 1.25 mg, indapamida 0.625 mg, bisoprolol 2.5 mg	Australia	Monoterapia: reducción de la presión arterial sistólica en 6.9 mmHg a las 12 semanas. Tasa de control de presión sanguínea = 58 % <i>Quadpill</i> . Reducción de la presión arterial sistólica de 7.7 mmHg a las 52 semanas. Tasa de control = 81 %	Chow y cols. (2021)
605	Monoterapia vs. terapia dual	Losartán 50 mg o hidroclorotiazida 12.5 mg	Losartán 50 mg más hidroclorotiazida 12.5 mg	Reino Unido	La terapia combinada redujo más la presión sistólica comparada con la monoterapia después de 16 semanas (19 vs. 11 mmHg).	MacDonald y cols. (2017)
21	<i>Quadpill</i> vs. placebo		Irbesartán 37.5 mg, amlodipino 1.25 mg, hidroclorotiazida 6.25 mg y atenolol 12.5 mg	Australia	<i>Quadpill</i> redujo 19 mmHg la presión sistólica cuando se comparó con el grupo placebo.	Chow y cols. (2017)
90	<i>Quadpill</i> de baja dosis vs. terapia dual estándar	Irbesartán 150 mg + amlodipino 5 mg	Irbesartán 75 mg + metoprolol 23.75 mg + amlodipino 2.5 mg + indapamida 1.25 mg	China	<i>Quadpill</i> redujo la presión sistólica 22.61 mmHg y la terapia dual sólo redujo 17.94 mmHg.	Zhao y cols. (2023)
62	Monoterapia vs. <i>Quadpill</i>	Candesartán 8 mg	Candesartán 2 mg; amlodipino 1.25 mg; indapamida 0.625 mg; bisoprolol 2.5 mg	Estados Unidos	<i>Quadpill</i> redujo la presión sistólica 15.65 mmHg y la monoterapia redujo 10.87 mmHg.	Baldrige y cols. (2022)
108	Monoterapia vs. <i>Quadpill</i>	Amlodipino 5 mg; atenolol 50 mg, bendroflumetiazida 2.5 mg; o captopril 100 mg	Amlodipino 1.25 mg; atenolol 12.5 mg, bendroflumetiazida 0.625 mg, o captopril 25 mg	Irlanda	Amlodipino redujo 14 mmHg la presión sistólica y 7 mmHg la presión diastólica. Atenolol redujo 11 mmHg la presión sistólica y 7 mmHg la presión diastólica. Bendroflumetiazida redujo 8 mmHg la presión sistólica y 5 mmHg la presión diastólica. Captopril redujo 15 mmHg la presión sistólica y 9 mmHg la presión diastólica. La terapia cuádruple redujo 26 mmHg la presión sistólica y 15 mmHg la presión diastólica.	Mahmud y Feely (2007)

mentos diferentes en dosis ultra bajas en una sola píldora. Esta estrategia es de particular interés como una opción en pacientes con hipertensión resistente o difícil de controlar. En general, la terapia cuádruple combina: 1) un diurético; 2) un inhibidor de la enzima convertidora de angiotensina o un antagonista de los receptores de angiotensina II; 3) un bloqueador de los canales de calcio, y 4) un betabloqueador. Los estudios han demostrado que la terapia

cuádruple es más efectiva que la monoterapia estándar para reducir la presión arterial (Tabla 2).

En los ensayos Quartet, se ha observado que los pacientes tienen una mayor reducción en la presión arterial sistólica y diastólica en comparación con la monoterapia tanto a corto como a largo plazo (Abuelazm y cols., 2023; Chow y cols., 2021). Por ejemplo, Chow y cols. (2021) realizaron un estudio con 591 participantes a los que les administraron



una pastilla con combinación cuádruple (irbesartán, amlodipino, indapamida, bisoprolol) utilizando dosis bajas. Los resultados de este estudio demostraron una mayor reducción de la presión arterial en pacientes tratados con *quadpill*, con una tasa de control de la presión arterial del 81 % en comparación con la monoterapia, donde se obtuvo una tasa de control de apenas el 58 % después de la administración de 150 mg de irbesartán.

La terapia cuádruple representa, pues, una estrategia prometedora para el manejo de la hipertensión, ya que también ha demostrado ser segura y bien tolerada por los pacientes. Además, se ha reportado que tiene una alta tasa de adherencia y sus efectos adversos se han reportado sin diferencias significativas. Estos puntos sugieren que la terapia cuádruple es una opción viable para aquellos pacientes que no logran sus objetivos con la monoterapia o la terapia combinada estándar. Además, podría ser más útil iniciar un tratamiento con una píldora que trae dosis bajas de medicamentos que intensificar la dosis de un solo medicamento o recurrir a dosis estándar de varios medicamentos.

Tradicionalmente se ha pensado que se puede controlar la hipertensión con un solo medicamento. Sin embargo, conforme avanza el tiempo y se hacen nuevos estudios se confirma que la terapia combinada como formulación farmacéutica, incluida la terapia cuádruple, constituye el mejor tratamiento para la hipertensión. Esto no sólo por el mayor índice de eficacia que presenta en la reducción de la presión arterial, sino también porque tiene menos efectos indeseados sobre la persona, además de no perder su efecto a largo plazo.

Lesly Grisel Rodríguez Chávez

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
al203147@alumnos.uacj.mx

Georgina Escudero Hermosillo

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
georgina.escudero@uacj.mx

Mayra Cristina García Anaya

Universidad Autónoma de Ciudad Juárez.
mayra.garcia@uacj.mx

Referencias específicas

- Abuelazm, M., S. Ali, O. Saleh, A. Badr, O. Altobaishat *et al.* (2023), "The safety and efficacy of quadruple ultra-low-dose combination (quadpill) for hypertension treatment: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials", *Clinical Drug Investigation*, 43(11):813-826.
- Baldrige, A. S., M. D. Huffman, D. Lazar, H. Abbas, F. M. Flowers *et al.* (2022), "Efficacy and safety of a quadruple ultra-low-dose treatment for hypertension (QUARTET USA): Rationale and design for a randomized controlled trial", *American Heart Journal*, 254:183-193.
- Chow, C. K., J. Thakkar, A. Bennett, G. Hillis, M. Burke *et al.* (2017), "Quarter-dose quadruple combination therapy for initial treatment of hypertension: placebo-controlled, crossover, randomised trial and systematic review", *The Lancet*, 389(10073):1035-1042.
- Chow, C. K., E. R. Atkins, G. S. Hillis, M. R. Nelson, C. M. Reid *et al.* (2021), "Initial treatment with a single pill containing quadruple combination of quarter doses of blood pressure medicines versus standard dose monotherapy in patients with hypertension (QUARTET): a phase 3, randomised, double-blind, active-controlled trial", *The Lancet*, 398(10305):1043-1052.
- Gorostidi, M. y A. de la Sierra (2013), "Combination therapy in hypertension", *Advances in Therapy*, 30: 320-336.
- MacDonald, T. M., B. Williams, D. J. Webb, S. Morant, M. Caulfield, J. K. Cruickshank *et al.* (2017), "Combination therapy is superior to sequential monotherapy for the initial treatment of hypertension: A double-blind randomized controlled trial", *Journal of American Heart Association*, 6(11):e006986.
- Mahmud, A. y J. Feely (2007), "Low-dose quadruple antihypertensive combination: more efficacious than individual agents-a preliminary report", *Hypertension*, 49(2):272-275.
- OMS (2019), "Hipertensión", Organización Mundial de la Salud [en línea]. Disponible en: <<https://www.who.int/es/health-topics/hypertension>>, consultado el 22 de abril de 2025.
- Ramos, M. V. (2019), "Hipertensión arterial: novedades de las guías 2018", *Revista Uruguaya de Cardiología*, 34(1):53-60.
- Rosas-Peralta, M., G. Borrayo-Sánchez, L. Alcocer, J. L. Durán-Arenas y V. H. Borja-Aburto (2020), "Terapia dual o triple en hipertensión arterial sistémica, ¿a quiénes, cuándo y con qué?", *Gaceta Médica de México*, 156(3):225-228.
- Sabio, R., P. Valdez, Y. Abuabara Turbay, R. E. Andrade Belgeri, G. A. Arbo Oze de Morvil *et al.* (2019), "Recomendaciones latinoamericanas para el manejo de la hipertensión arterial en adultos (RELAHTA 2)", *Revista Virtual de la Sociedad Paraguaya de Medicina Interna*, 6(1):86-123.
- Velasco, M. J. y J. McDermott (2010), "Hipertensión arterial: monoterapia vs. terapia combinada", *Medicina*, 15(4):275-282.
- Yang, H., H. Xing, X. Zou, M. Jin, Y. Li *et al.* (2025), "Efficacy and safety of intensive blood pressure control in patients over 60 years: A systematic review and meta-analysis", *Clinical and Experimental Hypertension*, 47(1):2465399.
- Zhao, X., Y. Chen, G. Yang, X. Li, X. Tang *et al.* (2023), "Initial treatment with a single capsule containing half-dose quadruple therapy vs. standard-dose dual therapy in hypertensive patients (QUADUAL): study protocol for a randomized, blinded, crossover trial", *American Heart Journal*, 264:10-19.

Nayely Leyva López, José Basilio Heredia y Erick Paul Gutiérrez Grijalva

Plantas medicinales mexicanas contra la diabetes

El uso de plantas para tratar enfermedades se remonta a nuestros antepasados. Las plantas han sido la base para el desarrollo de medicamentos y su uso medicinal sigue siendo muy extendido por todo el mundo. México es un país que cuenta con una gran diversidad de plantas, algunas de las cuales podrían tener potencial para emplearse en el tratamiento de la diabetes.

¿Qué es la diabetes?

El término “diabetes” fue acuñado por Areteo de Capadocia en el siglo II de nuestra era, al observar una condición caracterizada por una excesiva eliminación de orina; más tarde se le añadió la palabra “mellitus” (miel), cuando se descubrió que la orina era dulce. Durante siglos, ésta se conoció como una sola enfermedad; sin embargo, después del descubrimiento de la **insulina** en 1921, por Banting y Best, se observó que algunos pacientes (principalmente los jóvenes) dependían totalmente de esta hormona para sobrevivir, mientras que otros (en general adultos con sobrepeso) podían controlarse sin ella. En 1959, Berson y Yalow desarrollaron un método para medir insulina en sangre y encontraron que algunos pacientes tenían deficiencia absoluta (lo que hoy se conoce como diabetes tipo 1 por su origen autoinmune) y otros tenían niveles altos con resistencia a su acción (diabetes tipo 2). A partir de los años setenta y ochenta, estas diferencias se consolidaron en la clasificación actual que reconoce la diabetes tipo 1 y tipo 2 como enfermedades distintas en su origen y tratamiento.

La diabetes es una enfermedad no transmisible en la que el cuerpo pierde la capacidad de transformar el azúcar (glucosa) en energía, lo que provoca que ese azúcar se acumule en la sangre. La característica más común de la diabetes es la “hiperglucemia”, es decir, los niveles altos de glucosa en la sangre. En el caso de que los valores se encuentren en el rango de 100 a 125 mg/dl, se conoce como prediabetes; si los valores de azúcar son superiores a los 126 mg/dl, se denomina diabetes.

El páncreas es el órgano responsable de producir la hormona llamada insulina. La función de la insulina es llevar la glucosa (obtenida de los alimentos) desde la

Insulina

Hormona (sustancia química que produce el cuerpo para enviar mensajes entre distintos órganos) que se produce en el páncreas y que sirve para que la glucosa (azúcar) de los alimentos entre a las células del cuerpo para usarse como energía.



sangre hacia las células, en donde se convierte en energía. En personas que padecen diabetes tipo 1, el páncreas no puede producir insulina. En la diabetes tipo 2, el cuerpo no es capaz de usar de manera correcta la insulina producida; es decir, se presenta una “resistencia a la insulina”. Existe un tercer tipo de diabetes conocido como diabetes gestacional, el cual sólo se presenta durante el embarazo y sus causas son aún desconocidas (National Institute of Diabetes, 2023). Estos problemas con la insulina son los responsables del aumento de los niveles de azúcar en la sangre.

La diabetes puede ocasionar la aparición de diversos síntomas, tales como sensación de sed y ganas frecuentes de orinar, visión borrosa, fatiga, hambre, hormigueo en extremidades y problemas para cicatrizar, entre otros. Cuando la diabetes se complica puede incluso llegar a causar fallas renales (daño en riñones), ataques al corazón, ceguera, derrames cerebrales o amputaciones de extremidades. Lo anterior deja de manifiesto la importancia de la temprana detección de la diabetes y su tratamiento oportuno.

■ **Diabetes en México y su impacto económico**

■ La diabetes es una enfermedad de alta prevalencia en México y ha sido, desde el año 2000, la principal causa de muerte en mujeres y la segunda en hombres. En 2018, alrededor de 8.6 millones de personas mayores de 20 años contaban con un diagnóstico de diabetes. A nivel nacional, la tasa de mortalidad por diabetes mellitus en 2020 fue de 11 fallecimientos por cada 10 000 habitantes. En 2021, el 13 % de las defunciones en México fueron a causa de la diabetes (140 729 defunciones) (INEGI, 2021). Se proyecta que la prevalencia de la diabetes en México se incrementará un 17.9 % para 2045, lo que equivale a alrededor de 24 millones de adultos con diabetes.

Adicionalmente, el costo promedio para un paciente diabético en control supera los 88 000 pesos anuales en gastos de material médico, revisiones médicas, estudios clínicos y cirugías; mientras que para un paciente sin control y con complicaciones el monto es superior al millón de pesos (Federación Mexicana de Diabetes, 2019). Adicionalmente, se

ha reportado que en México se destinan más de 70 000 millones de pesos anuales en atención a pacientes con diabetes, lo que representa alrededor del 34 % del gasto en salud. Este impacto económico ubica a la diabetes dentro de las cinco enfermedades más costosas en México. En la proyección a futuro en el ámbito económico se espera que el gasto sanitario en atención a la diabetes en México para 2045 alcance los 25 490 millones de dólares. Tanto por su prevalencia como por la carga económica que genera, la diabetes se ha vuelto un tema de interés de salud pública en nuestro país y esto subraya la urgente necesidad de implementar estrategias efectivas para su prevención y control.

■ **¿Cómo se trata la diabetes?**

■ La diabetes tipo 1, al ser una enfermedad autoinmune con destrucción total de las células beta del páncreas, requiere tratamiento médico estricto e insulina de por vida desde el momento del diagnóstico; este tipo de diabetes no puede controlarse sólo con dieta o ejercicio. En cambio, la diabetes tipo 2 puede tratarse inicialmente realizando ajustes en el estilo de vida; por ejemplo, modificar la dieta regular enfocándose principalmente en la reducción en la ingesta de carbohidratos para bajar los niveles de glucosa en la sangre, incrementar la actividad física



(ejercicio), así como eliminar el consumo de tabaco y alcohol. En el caso de la diabetes tipo 2 el enfoque del tratamiento es más amplio y progresivo que en la tipo 1, empezando con cambios en el estilo de vida, luego con medicación oral y finalmente mediante insulina si la función pancreática se deteriora. La personalización del tratamiento es esencial para lograr un buen control y prevenir complicaciones a largo plazo.

Convencionalmente, la diabetes tipo 2 se trata con diversos tipos de medicamentos que tienen distintos modos de acción. Por ejemplo, las biguanidas reducen la resistencia a la insulina favoreciendo la captación de la glucosa por las células del músculo; las meglitinidas favorecen la generación de insulina en el páncreas, y los inhibidores de α -glucosidasa (enzima que participa en la desintegración de los carbohidratos o azúcares) reducen la absorción de azúcares desde el tracto digestivo.

El uso prolongado de estos medicamentos de tipo convencional provoca efectos adversos como náuseas, dolor abdominal, flatulencias y aumento de peso, entre otros (véase la [Figura 1](#)). De ahí que el uso de plantas medicinales para el tratamiento de la diabetes, en combinación con medicamentos convencionales, pueda ayudar a reducir esos efectos adversos y mejorar la calidad de vida de las personas que padecen diabetes.



Figura 1. Efectos adversos de tipo gastrointestinal provocados por el uso prolongado de medicamentos convencionales para tratar la diabetes.

Plantas medicinales contra la diabetes

En términos generales, cualquier planta que pueda emplearse para tratar alguna enfermedad o padecimiento es considerada medicinal. Específicamente, una planta medicinal es aquella que contiene compuestos bioactivos capaces de ejercer efectos terapéuticos en el organismo humano o animal, y que se utiliza de manera tradicional o farmacéutica para prevenir, aliviar, tratar o curar enfermedades o trastornos de salud.

Ahora bien, para que una planta medicinal sea reconocida oficialmente como remedio herbolario en México, es necesario cumplir con ciertos requisitos establecidos por la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (Cofepris). Esto incluye la obtención de un registro sanitario, que requiere la presentación de información técnica y científica que demuestre la identidad, pureza, estabilidad y eficacia del producto, así como cumplir con las buenas prácticas de fabricación según la NOM-248-SSA1-2011 (Secretaría de Salud, 2011). La falta de estudios clínicos robustos y datos toxicológicos es uno de los principales obstáculos para la validación y registro de estas plantas como tratamientos herbolarios oficiales.

Adicionalmente, es importante mencionar que en la Ley General de Salud de México (2022), en su Título Segundo, Capítulo I. Disposiciones comunes, Artículo 6°, VI bis, se menciona que el Sistema Nacional de Salud tiene entre sus objetivos el de promover el conocimiento y desarrollo de la medicina tradicional indígena y su práctica en condiciones adecuadas, lo que deja de manifiesto el interés y la importancia del estudio y el respaldo científico del uso de las plantas como remedios terapéuticos. En este contexto, la *Farmacopea Herbolaria de los Estados Unidos Mexicanos* (FHEUM) considera una gran variedad de plantas que pueden utilizarse en la medicina herbolaria para tratar la diabetes; por ejemplo, la chaya, el cuajilote y el nopal, entre otros (véase la [Tabla 1](#)).

En México existe una gran diversidad de “tesoros verdes” que han sido empleados como plantas medicinales por nuestros ancestros, y cuyo uso ha sido transmitido de generación en generación. Con la

Tabla 1. Plantas de uso etnobotánico en México para tratar la diabetes. Tomado de *Farmacopea Herbolaria de los Estados Unidos Mexicanos 3.0*.

Nombre común	Especie (sinónimo)	Partes de la planta
Agritos	<i>Rhus aromatica (R. trilobata)</i>	Tallo, hojas y fruto
Catarinilla	<i>Salpianthus macrodonthus</i>	Tallo y hojas
Chaya	<i>Cnidoscolus aconitifolius (C. chayamansa)</i>	Hojas
Cuajilote	<i>Parmentiera aculeata</i>	Raíz
Guarumbo, chancarro	<i>Cecropia obtusifolia</i>	Hojas
Guásima	<i>Guazuma ulmifolia</i>	Fruto
Guayacán amarillo	<i>Helietta parvifolia</i>	Tallo
Guayacán amarillo	<i>Guaiacum coulteri</i>	Tallo
Lágrimas de San Pedro	<i>Coix lacryma-jobi</i>	Tallo y hojas
Lantrisco	<i>Rhus pachyrrhachis</i>	Hojas y ramas
Malabar	<i>Solanum verbascifolium</i>	Hojas y tallo
Marrubio	<i>Marrubium vulgare</i>	Tallo y hojas
Matarique	<i>Psacalium peltatum (Cacalia peltata)</i>	Raíz
Matarique	<i>Psacalium decompositum (Cacalia decomposita)</i>	Raíz
Niguilla	<i>Rhipsalis baccifera</i>	Tallo
Nispero	<i>Eriobotrya japonica</i>	Hojas
Nopal xoconostle	<i>Opuntia streptacantha</i>	Penca
Taray	<i>Salix taxifolia</i>	Tallo y hojas
Tomate verde	<i>Physalis philadelphica</i>	Cáliz
Tronadora	<i>Tecoma stans</i>	Hojas y ramas

Conquista, la diversidad de plantas medicinales en México se enriqueció mediante el intercambio de conocimientos entre la herbolaria indígena y la medicina europea, pero también se fortaleció el valor de especies endémicas que ya eran utilizadas por las culturas prehispánicas. Entre las plantas medicinales nativas de México que destacan están el cacao (*Theobroma cacao*), usado como tónico y para el corazón; el copal (*Bursera* spp.), empleado en rituales y como antiséptico; el cuachalalate (*Amphipterygium adstringens*), útil para problemas gastrointestinales; el epazote (*Dysphania ambrosioides*), usado contra parásitos intestinales; el pericón (*Tagetes lucida*), utilizado como digestivo y relajante, y la chaya (*Cnidoscolus aconitifolius*), valorada por sus propiedades nutritivas y antidiabéticas. Estas especies, ya integradas en el saber tradicional mesoamericano, adquirieron mayor difusión y documentación gracias al interés de cronistas y médicos europeos.

En México se estima que existen alrededor de 4 500 especies de plantas medicinales, de las cuales aproximadamente 100 se emplean tradicionalmente en el tratamiento de la diabetes. Sin embargo, sólo una parte de estas especies ha sido objeto de estudios científicos que respalden su eficacia y seguridad en el manejo de esta enfermedad. Por ejemplo, el nopal (*Opuntia ficus-indica*) ha demostrado efectos hipoglucemiantes en diversas investigaciones. Así, en un estudio realizado en México se demostró que el consumo de 300 g de nopal cocido reduce significativamente el azúcar en la sangre después de las comidas en personas con diabetes tipo 2. Además, éste disminuye ciertas hormonas que elevan el azúcar y mejora las defensas antioxidantes del cuerpo. Aunque no reemplaza los medicamentos, el estudio confirma que incluir nopal en la dieta puede ser una opción natural y segura para apoyar en el tratamiento de la diabetes (López-Romero y cols., 2014).

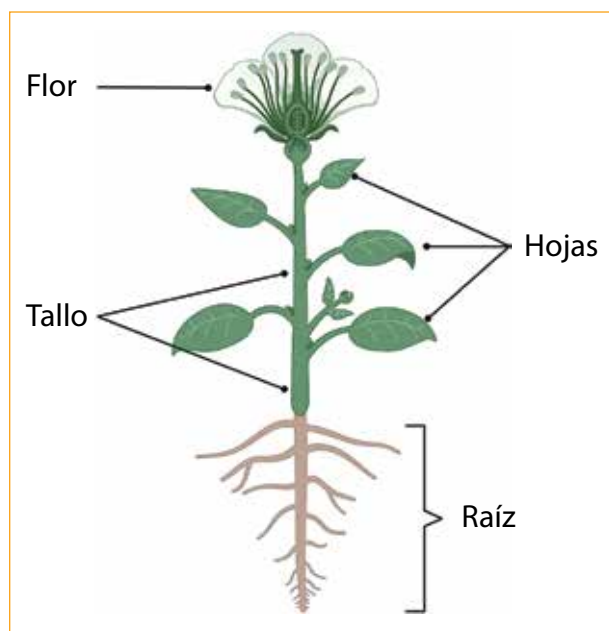


Figura 2. Partes de las plantas comúnmente utilizadas para elaborar las preparaciones con uso medicinal.

De manera tradicional, los remedios con plantas medicinales se preparan usando la planta completa o sólo alguna de sus partes, como las raíces, tallos, hojas, flores o frutos. Lo más común es usarlas en forma de infusiones, como “tés” caseros (**Figura 2**). Según la FHEUM, una infusión se prepara colocando la parte de la planta medicinal recomendada (como hojas o flores) en agua recién hervida, se tapa y se deja reposar de 5 a 15 minutos, dependiendo del tipo de planta. Luego se cuela y se consume. Este método es común para aprovechar las propiedades terapéuticas de las plantas, siempre siguiendo las indicaciones específicas para cada especie y usando material limpio y de calidad. Por ejemplo, el uso de infusiones a partir de las hojas de tronadora (*Tecoma stans*) para tratar la diabetes se remonta a más de 100 años en la medicina tradicional mexicana. Aguilar-Santamaría y cols. (2009) reportaron que en ratas diabéticas los extractos acuosos de hojas de tronadora a 1.7 mg/mL inhiben en 58 % la actividad de una enzima denominada α -glucosidasa, y administrados a una dosis de 500 mg/kg reducen los niveles de azúcar en ratas con diabetes después de ingerir almidón de maíz.

La chaya (*Cnidoscolus chayamansa*) es otra planta medicinal estudiada por su efecto antidiabético, ya

que ratones con diabetes tipo 2 que fueron alimentados con un concentrado de hojas secas de chaya redujeron significativamente su peso corporal y sus niveles de glucosa en sangre (Ramasubramanian y cols., 2022).

Por otro lado, el efecto del consumo de infusiones de hojas de guarumbo (*Cecropia obtusifolia*) en modelos animales y en pacientes con diabetes tipo 2 demostró que el té preparado con esta planta reduce los niveles de azúcar en la sangre de manera comparable a la metformina (medicamento) (DGCS-UNAM, 2012). Y el potencial antidiabético del orégano mexicano (*Lippia graveolens*) se ha reportado con los extractos de esta planta medicinal a una concentración de 400 μ g/mL por su efecto inhibitor de las enzimas α -glucosidasa y amilasa, encargadas del metabolismo de carbohidratos (Picos-Salas y cols., 2021), el cual fue atribuido al contenido de ácidos fenólicos y flavonoides.

Cabe mencionar que el efecto terapéutico de las plantas medicinales se debe a la presencia de sustancias químicas denominadas “compuestos bioactivos”. Un compuesto bioactivo es cualquier molécula capaz de interactuar con componentes de los órganos o tejidos ejerciendo su efecto biológico en los organismos vivos. Estos compuestos bioactivos pertenecen a grupos de diferente naturaleza química, tales como los compuestos fenólicos: ácidos fenólicos, flavonoides y taninos; terpenos: aceites esenciales y pigmentos; alcaloides y péptidos, entre otros. Tales compuestos pueden ser estudiados de manera individual para determinar su efecto como sustancias capaces de reducir los niveles de azúcar en la sangre (hipoglucemiantes), así como para disminuir la incidencia de los síntomas provocados por los medicamentos convencionales que se utilizan para tratar la diabetes (**Figura 3**), de tal forma que pueden llegar a ser candidatos para el desarrollo de nuevos fármacos.

Conclusiones

La diabetes es una enfermedad compleja y de gran impacto en la salud pública en México, donde su prevalencia y costos asociados van en aumento. Aunque existen tratamientos médicos eficaces, muchos

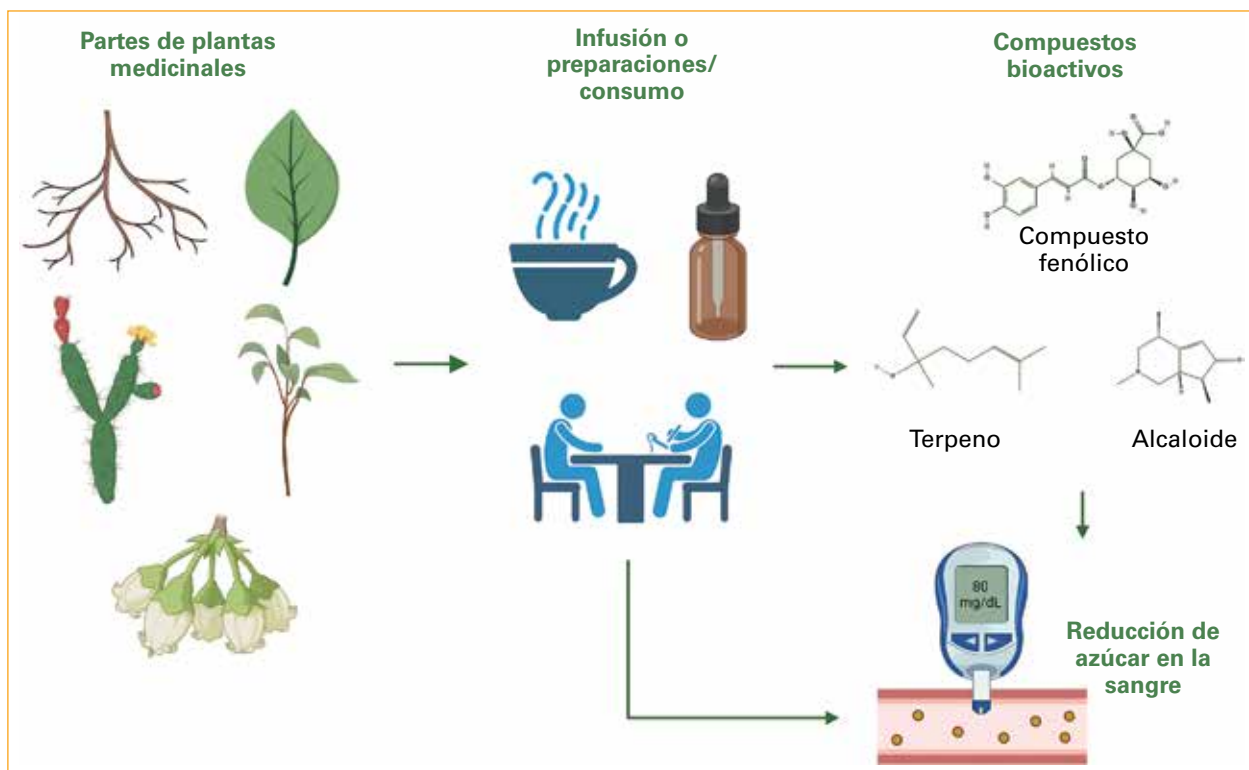


Figura 3. El consumo regular de plantas medicinales ayuda a reducir el azúcar en la sangre.

pacientes enfrentan efectos adversos y dificultades para mantener el control de la enfermedad a largo plazo. En este contexto, las plantas medicinales, con siglos de uso tradicional y un creciente respaldo científico, representan una alternativa complementaria valiosa. Las especies como el nopal, la chaya, la tronadora y el guarumbo han mostrado en estudios preclínicos y clínicos sus efectos positivos para reducir las concentraciones de glucosa en sangre y mejorar el metabolismo. Sin embargo, para que estos recursos naturales puedan integrarse de manera formal y segura a la atención médica, es fundamental continuar con la investigación científica rigurosa, promover su regulación sanitaria y difundir su uso responsable. Aprovechar la riqueza de la herbolaria mexicana no sólo puede mejorar la calidad de vida de las personas con diabetes, sino también fortalecer el vínculo entre el conocimiento ancestral y la ciencia moderna.

Nayely Leyva López

Estancia Posdoctoral por México, Secihti-Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Unidad Culiacán.
nayely.leyva@ciad.mx

José Basilio Heredia

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Unidad Culiacán.
jbheredia@ciad.mx

Erick Paul Gutiérrez Grijalva

Investigador por México, Secihti-Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A. C., Unidad Culiacán.
erick.gutierrez@ciad.mx

Referencias específicas

- Aguilar-Santamaría, L., G. Ramírez, P. Nicasio, C. Alegría-Reyes y A. Herrera-Arellano (2009), "Antidiabetic activities of *Tecoma stans* (L.) Juss. ex Kunth", *Journal of Ethnopharmacology*, 124(2):284-288.
- Comisión Permanente de la Farmacopea de los Estados Unidos Mexicanos (2021), *Farmacopea Herbolaria de los Estados Unidos Mexicanos* 3.0, México, Secretaría de Salud.
- DGCS-UNAM (2012), "Controlan con té del árbol guarumbo niveles de glucosa en diabéticos", Dirección General de Comunicación Social, Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: https://www.dgcs.unam.mx/boletin/bdboletin/2012_748.html, consultado el 14 de mayo de 2025.
- Federación Mexicana de Diabetes (2019), "Los costos de la diabetes", Federación Mexicana de Diabetes, A. C. [en línea]. Disponible en: <https://fmdiabetes.org/los-costos-la-diabetes/>, consultado el 14 de mayo de 2025.
- INEGI (2021), "Estadísticas a propósito del día mundial de la diabetes (14 de noviembre)", Instituto Nacional de Estadística y Geografía, comunicado de prensa. Disponible en: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/aproposito/2021/EAP_Diabetes2021.pdf, consultado el 14 de mayo de 2025.
- Ley General de Salud (2022), *Diario Oficial de la Federación*, última reforma publicada DOF 07-06-2024. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGS.pdf>, consultado el 14 de mayo de 2025.
- López-Romero, P., E. Pichardo-Ontiveros, A. Ávila-Nava, N. Vázquez-Manjarrez, A. R. Tovar et al. (2014), "The effect of nopal (*Opuntia ficus indica*) on postprandial blood glucose, incretins, and antioxidant activity in Mexican patients with type 2 diabetes after consumption of two different composition breakfasts", *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 114(11):1811-1818.
- National Institute of Diabetes and Digestive and Kidney Diseases (2023), "¿Qué es la diabetes" [en línea]. Disponible en: <https://www.niddk.nih.gov/health-information/informacion-de-la-salud/diabetes/informacion-general/que-es>, consultado el 14 de mayo de 2025.
- Picos-Salas, M. A., E. P. Gutiérrez-Grijalva, B. Valdez-Torres, M. A. Angulo-Escalante, L. X. López-Martínez et al. (2021), "Supercritical CO₂ extraction of oregano (*Lippia graveolens*) phenolic compounds with antioxidant, α -amylase and α -glucosidase inhibitory capacity", *Journal of Food Measurement and Characterization*, 15(4):3480-3490.
- Ramasubramanian, B., C. Griffith, M. Hanson, L. E. Bunkin, A. P. Reddy et al. (2022), "Protective effects of Chaya against mitochondrial and synaptic toxicities in the type 2 diabetes mouse model TallyHO", *Cells*, 11(4):744.
- Secretaría de Salud (2011), "Norma Oficial Mexicana NOM-248-SSA1-2011. Buenas prácticas de fabricación para establecimientos dedicados a la fabricación de remedios herbolarios", *Diario Oficial de la Federación*. Disponible en: <https://www.dof.gob.mx/normas-Oficiales/4676/salud/salud.htm>, consultado el 14 de mayo de 2025.

Luis F. García Uc, Juan Hernández Tecorralco y Romeo de Coss

Quetzalcoatlita: mineral descubierto en México con propiedades cuánticas

México es un país con una extensa diversidad de minerales, algunos de los cuales no han sido lo suficientemente estudiados. Uno de ellos es la quetzalcoatlita, que tiene una hermosa coloración azul y forma de erizo, y fue nombrado así en honor al dios prehispánico Quetzalcóatl. Además de su belleza, poco se sabe de sus propiedades, pero su estructura cristalina y composición química podrían dar origen a exóticas y fascinantes características, las cuales harían a este mineral un interesante compuesto para novedosas aplicaciones tecnológicas.

Era septiembre del año 2021 y la Mineral Cup –la cual es una competencia internacional organizada en redes sociales, como X e Instagram (Mineral Cup, 2025)– reunió 32 piedras preciosas para competir por el título del mineral del año. En esta edición, figuraban minerales muy conocidos por el público, como el grafito, el zirconio y el cuarzo, pero todos éstos serían derrotados por una piedra muy poco conocida y de origen mexicano, la quetzalcoatlita (**Figura 1**). Este mineral fue descubierto en 1973 en una mina cercana a Moctezuma, Sonora, México (Williams, 1973), y fue nombrado en honor del dios mexica Quetzalcóatl, en alusión a su color azul capri.

Al momento de su descubrimiento se pensó que era parte de otro mineral ya conocido en esa época, pero un análisis químico demostró que se trataba de un nuevo compuesto. La quetzalcoatlita presenta delgados filamentos unidos en una hermosa forma de erizo y, a pesar de que su apariencia está bien descrita, poco se sabe de sus propiedades, por lo que resultó ser un mineral tan bello como enigmático. No obstante, de los estudios que existen a la fecha podemos inferir algunas de sus fascinantes propiedades.





Figura 1. Quetzalcoatlita encontrada en la mina Blue Bell, California, EUA. Fuente: Hudson Institute of Mineralogy (2022) / Daniel J. Evanich.

■ **Estructura cristalina y composición química:**
■ **combinación de cobre, telurio y otros elementos**
■ Entre todos los aspectos visibles de la quetzalcoatlita resalta el color, un precioso azul que se puede

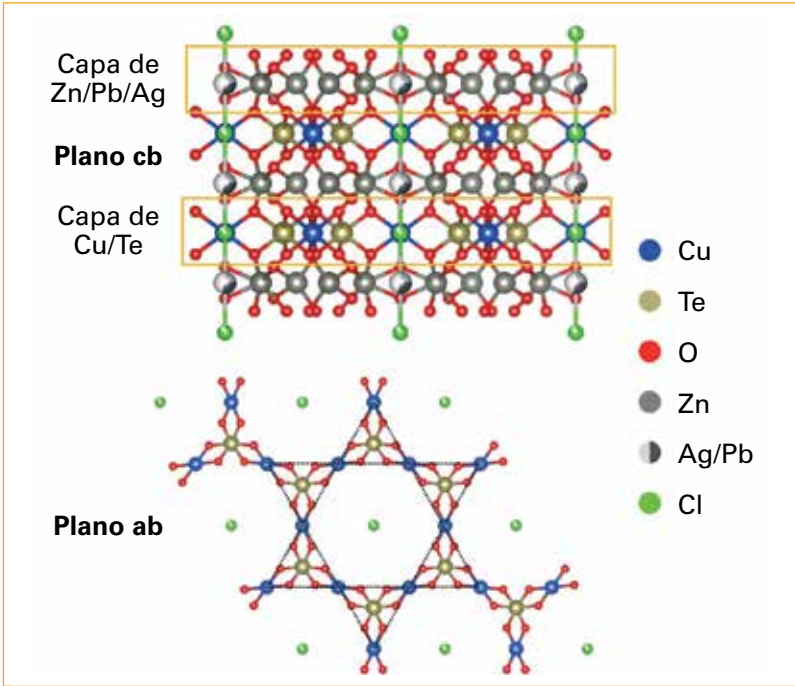


Figura 2. Estructura de la quetzalcoatlita desde una vista lateral (arriba) donde se aprecian las capas que contienen a las redes de Kagomé separadas por las capas de Zn; y una vista superior (abajo) donde se puede observar la formación de la red de Kagomé en la capa.

comparar con el color del agua de ciertas playas del Caribe mexicano, el cual se debe a la mezcla de los diferentes elementos presentes en su composición química. Los elementos que conforman la quetzalcoatlita son: plomo, telurio, zinc, metales nobles como cobre y plata, así como hidrógeno, oxígeno y cloro. De tal manera que la fórmula general es $Zn_6Cu_3(TeO_3)_2O_6(OH)_6AgPbCl$ (Burns y cols., 2000). Las propiedades de un material están determinadas en parte por cómo están ordenados sus átomos, es decir, por cómo se encuentran distribuidos en el espacio. El ordenamiento de la quetzalcoatlita es algo peculiar (véase la **Figura 2**), ya que está conformada de capas de cobre en una red de Kagomé perfecta, la cual es una red conformada de triángulos que comparten el vértice (véase la **Figura 3**).

En la quetzalcoatlita los átomos de cobre (Cu) se encuentran colocados en los vértices de una “estrella de David”, en cuyo centro se encuentra posicionado un átomo de cloro (Cl). Además, en la parte interna de cada triángulo de la estrella se encuentra un átomo de telurio (Te), lo que crea una estructura hexagonal secundaria. Todo esto no sería posible sin los átomos de oxígeno (O) que unen a los átomos metálicos. No hay que olvidar a la plata (Ag) y el plomo (Pb), cuyas presencias dentro del mineral se identificaron hasta el año 2000, cuando Burns y cols. reportaron que en la quetzalcoatlita había una mezcla de estos dos elementos.

Ahora bien, todo esto lo sabemos gracias a los estudios con difracción de rayos X, técnica que permite determinar las posiciones de los átomos en un material donde sus átomos están ordenados de manera regular y periódica, a la cual llamamos estructura cristalina. Pero aún queda un misterio por resolver sobre su estructura, ya que la técnica de difracción de rayos X presenta limitaciones para identificar la posición de átomos muy ligeros, como el hidrógeno, razón por la cual a la fecha no hay reportes que indiquen el lugar exacto de estos átomos en la estructura cristalina de la quetzalcoatlita.

Finalmente, las capas que contienen a las redes de Kagomé no interactúan directamente, ya que están separadas por capas de átomos de zinc (Zn), lo que favorece un carácter cuasi bidimensional.

Candidato potencial a líquido de espín cuántico

A pesar de haber sido descubierta hace casi 50 años, solamente se ha determinado de manera parcial la forma en que sus átomos están arreglados, por lo que aún se desconoce mucho sobre este mineral, de modo que queda un nicho de oportunidades de donde podrían surgir novedosas investigaciones. La red de Kagomé que forman los átomos de Cu en este mineral es una de las características más interesantes que podría relacionarse con un estado magnético especial llamado líquido de espín cuántico (QSL, por sus siglas en inglés).

Un QSL es usualmente definido como un estado de la materia en el que los momentos magnéticos de los átomos —que podemos imaginar como pequeños imanes atómicos— no se alinean en un patrón fijo, ni siquiera a una temperatura de cero kelvin o -273°C . Desde el punto de vista termodinámico, el QSL no es tan diferente del estado paramagnético, estado en el que los pequeños imanes atómicos están desordenados (véase la Figura 4 superior izquierda) como resultado del incremento de la temperatura. La diferencia es que en un QSL los imanes atómicos no se organizan en un solo patrón, ya que existe una combinación de muchas posibles configuraciones diferentes que cambian constantemente, debido a efectos cuánticos. En otras palabras, el estado de menor energía no tiene un solo ordenamiento magnético, sino una superposición de muchas formas posibles que suceden al mismo tiempo. Para ver la conexión que hay entre la quetzalcoatlita y los QSL es necesario visualizar el magnetismo que podrían generar los átomos de Cu en la red de Kagomé.

Los pequeños imanes atómicos suelen representarse con flechas que pueden girar y apuntar en cualquier dirección. En la quetzalcoatlita, cada átomo de Cu tiene su propia flecha, lo que significa que en cada vértice de la estrella de David podemos ubicar una flecha en distintas direcciones y sentidos. Además, el momento magnético que se asocia al Cu es pequeño y presenta fluctuaciones cuánticas fuertes; es decir, se necesitará muy poca energía para hacerlos rotar, lo que genera diferentes estados magnéticos. La primera distribución de estas flechas sería un estado donde todas las flechas apuntan en

Recuadro 1. Red de Kagomé

El término *Kagomé* proviene de los vocablos japoneses *kago*: canasta de bambú y *me*: patrón. Éste es un modelo muy popular para el tejido de canastas (Figura 3) y está compuesto por triángulos que comparten vértices, con lo que se crea una especie de estrella con un centro hexagonal. Esta estrella suele llamarse “estrella o escudo de David” en el judaísmo.

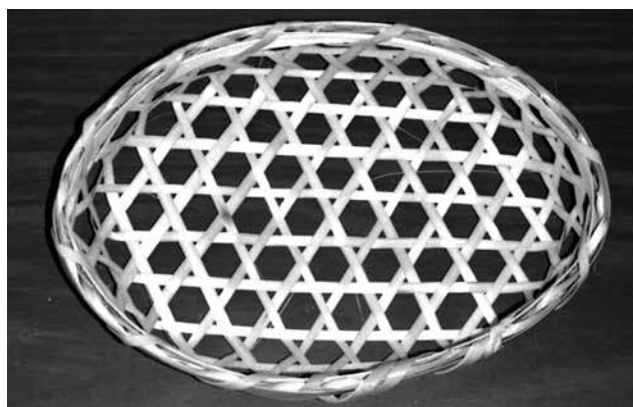


Figura 3. Red de Kagomé tejida en una canasta de bambú. Fuente: *Physics Today*, 2023.

Estado paramagnético



Estado ferromagnético



Estado antiferromagnético

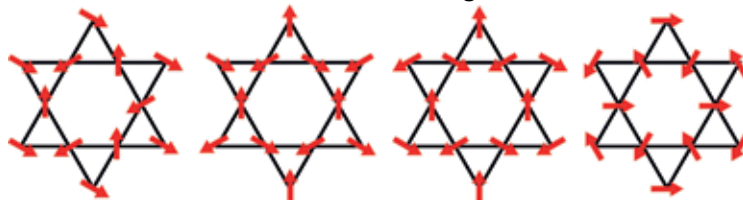


Figura 4. Posibles estados magnéticos en la estrella de David.

direcciones aleatorias, lo cual corresponde a un paramagneto (**Figura 4**, superior izquierda). En el otro extremo está el estado ferromagnético, en el que todas las flechas apuntan en una misma dirección y sentido, lo que genera un momento magnético neto diferente de cero (**Figura 4**, superior derecha).

Finalmente, tendríamos el estado antiferromagnético, en el que el momento magnético neto es cero; pero existen múltiples configuraciones posibles que podríamos tomar en cuenta, como se ve en la **Figura 4** (abajo). Se ha dicho en la literatura que en una red de Kagomé con orden antiferromagnético, todas las configuraciones posibles tienen la misma energía, es decir, ninguna es más estable que otra. Esto ocasiona que sea difícil definir un único estado base o de menor energía, debido a que cada uno tiene la misma probabilidad de existir. Esto da origen a una gran variedad de estados exóticos y fenómenos de naturaleza cuántica. De tal manera que, si en un sistema cristalino existen diferentes configuraciones donde ninguna es más probable de existir sobre otra, entonces podría originarse una superposición de todas las configuraciones antiferromagnéticas posibles y, por ende, presentar un estado de QSL. Un ejemplo de esto es el caso de la herbertsmithita (Pustogow y cols., 2017).

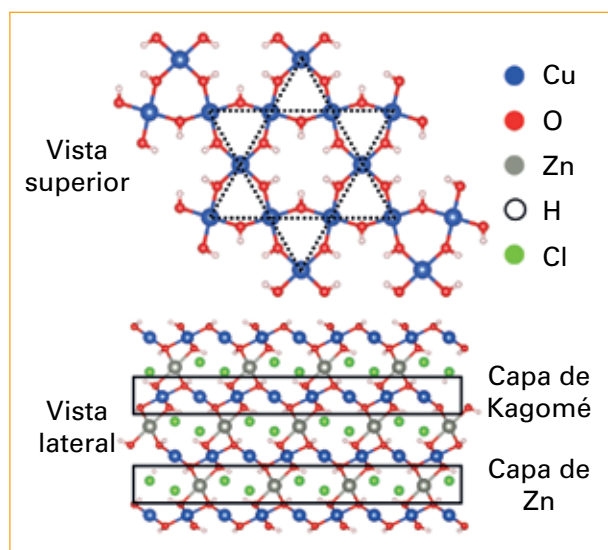


Figura 5. Estructura de la herbertsmithita desde una vista superior (arriba), donde se aprecian las capas que contienen a las redes de Kagomé; y lateral (abajo) donde se observa la separación de las capas que contienen a las redes de Kagomé por capas de Zn.

La herbertsmithita (**Figura 5**) es un potencial candidato para presentar un comportamiento de QSL, donde su estructura se parece mucho a la de la quetzalcoatlita: capas que contienen redes de Kagomé de átomos de Cu separadas por capas de átomos de Zn. A través del análisis de la susceptibilidad magnética —es decir, observando qué tanto puede magnetizarse un material en un campo magnético externo—, se vio que mientras aumentamos la cantidad de Zn y disminuimos la cantidad de Cu en el mineral, podemos pasar de un estado con carácter ferromagnético a otro donde aparentemente no se tiene un orden magnético. Esto ha sugerido la existencia de un comportamiento de QSL en la herbertsmithita.

Un largo camino por recorrer

La comunidad científica ha propuesto que los líquidos de espín cuántico podrían ser útiles para el desarrollo de tecnologías cuánticas (Unesco, 2025), de tal suerte que éste es uno de los principales intereses en el estudio de este tipo de compuestos. La quetzalcoatlita presenta características que podría conferirle un carácter de QSL, por lo que sería factible considerarla como un posible candidato a presentar este exótico estado de la materia. Sin embargo, queda un largo camino por recorrer en el estudio de sus propiedades magnéticas, así como en el desarrollo de experimentos novedosos que ayuden a “ver” el estado de QSL. Para la quetzalcoatlita aún es pronto para concluir que es un material cuántico, pero algo queda claro: la corona de la Mineral Cup 2021 la ganó con honores.

Luis F. García Uc

Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-IPN, Unidad Mérida.
luisf.garcia@cinvestav.mx

Juan Hernández Tecorralco

Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México.
juanht@fisica.unam.mx

Romeo de Coss

Departamento de Física Aplicada, Cinvestav-IPN, Unidad Mérida.
romeo.decoss@cinvestav.mx

Lecturas recomendadas

Dumé, I. (2021), “Promising quantum spin liquid candidate may fall short”, *PhysicsWorld*. Disponible en: <https://physicsworld.com/a/promising-quantum-spin-liquid-candidate-may-fall-short/>, consultado el 4 de abril de 2025.

Hudson Institute of Mineralogy (2022), “Quetzalcoatlite”, *Mindat.org*. Disponible en: <https://www.mindat.org/min-3343.html>, consultado el 4 de abril de 2025.

Mineral Cup (2025), *Mineralcup.org* [en línea]. Disponible en: <https://www.mineralcup.org/>, consultado el 4 de abril de 2025.

Unesco (2025), *International Year of Quantum Science and Technology (IYQ)* [en línea]. Disponible en: <https://quantum2025.org/>, consultado el 4 de abril de 2025.

Referencias específicas

Burns, P., J. Pluth, J. Smith, P. Eng, I. Steele *et al.* (2000), “A new octahedral-tetrahedral structure from a $2 \times 2 \times 40 \mu\text{m}^3$ crystal at the Advanced Photon Source-GSE-CARS Facility”, *American Mineralogist*, 85(3-4): 604-607. Disponible en: [DOI:10.2138/am-2000-0424](https://doi.org/10.2138/am-2000-0424), consultado el 4 de abril de 2025.

Norman, M. R. (2018), “Copper Tellurium Oxides – A Playground for Magnetism”, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 452:507-511. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2017.11.006>, consultado el 4 de abril de 2025.

Pustogow, A., Y. Li, I. Voloshenko, P. Puphal, C. Krellner *et al.* (2017), “Nature of optical excitations in the frustrated kagome compound Herbertsmithite”, *Physical Review B*, 96(24). Disponible en: <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.96.241114>, consultado el 4 de abril de 2025.

Williams, S. (1973), “Quetzalcoatlite, $\text{Cu}_4\text{Zn}_8(\text{TeO}_3)_3(\text{OH})_{18}$, a new mineral from Moctezuma, Sonora”, *Mineralogical Magazine*, 39(303):261-263. Disponible en: https://rruff.geo.arizona.edu/doclib/MinMag/Volume_39/39-303-261.pdf, consultado el 4 de abril de 2025.

José Ramón Cossío Díaz y Herson García Gallegos



Esfuerzo cognitivo y democracia

Para obtener algo que deseamos, necesitamos actuar. Y para actuar, necesitamos emplear energía. Esto es cierto tanto en términos materiales como cognitivos. Resultados recientes indican que el gasto de energía o “esfuerzo” cognitivo nos resulta aversivo, es decir, displacentero. Esto puede tener repercusiones de alto impacto para nuestra vida en democracia y las decisiones que en ésta se nos exigen.

Introducción

El esfuerzo cognitivo –o mental– implicado en el procesamiento de la información es un tema relevante para la psicología. Se ejerce cotidianamente y de manera diferencial, dependiendo de la tarea que afrontemos. La mayoría de las personas estará de acuerdo en que, por ejemplo, organizar las ideas de un manuscrito de manera que guarden una secuencia coherente entre ellas, implica esfuerzo. Puede que esta misma gente esté de acuerdo, también, en que redactar un ensayo requiere un mayor empeño cognitivo en comparación con la decisión de ordenar un platillo en un restaurante. Es así como el esfuerzo requerido para realizar diferentes actividades es determinante en la manera como interactuamos con ellas. Si al completar cierta actividad obtenemos una recompensa relevante, es probable que ejerzamos un mayor esfuerzo respecto de otras que no producen satisfactores o los producen en menor medida. En estos últimos casos desistiremos rápidamente de nuestros intentos, juzgando que la recompensa no es congruente con el trabajo requerido; así evitaremos un aburrimiento o agotamiento innecesario.

Las consecuencias de las anteriores determinaciones tienen delicadas implicaciones para el entendimiento de cualquier actividad en la que las personas deban tomar decisiones informadas. Reunir y retener información, comparar opciones y elaborar conclusiones requiere, además de una gran motivación, esfuerzo cognitivo. Considerando estos supuestos, es importante identificar aquellos aspectos de la vida social, cultural o política que las personas relegan a fin de “ahorrarse el esfuerzo”. Aquí queremos considerar uno de ellos, en tanto constituye una de las categorías más complejas y polémicas de nuestro tiempo: la democracia.



El costo del esfuerzo mental

 Si comenzamos con su definición, el esfuerzo se entiende como la metabolización de energía con el propósito de alcanzar un objetivo. En el ámbito físico, esta relación ha sido establecida con bastante precisión. Por ejemplo, se ha establecido que, dadas ciertas condiciones, la persona que corre cierta distancia consumirá cierta cantidad de calorías. En tareas que implican el procesamiento de información, la medición de la energía consumida requiere métodos similares. Así, se ha medido el esfuerzo cognitivo a través de registros psicofisiológicos, como el ritmo cardíaco, la glucosa en sangre o la dilatación de la pupila. También son comunes las medidas conductuales, como el porcentaje de respuestas correctas o el tiempo invertido.

Ahora bien, considerando los modelos teóricos de las neurociencias y la economía conductual, el uso de energía se ha entendido como un costo que los seres vivos siempre tratarán de reducir. En este sentido, se ha cuantificado la manera en la que un organismo selecciona siempre la opción en donde el trabajo resulte menor a la retribución. Respecto al esfuerzo cognitivo, existe evidencia sobre la optimización del costo como la razón por la que dependemos de estereotipos o estrategias mnemónicas para responder ante una gran variedad de situaciones, pues permiten simplificar la información de manera que pueda ser aplicada deductiva, ágil y anticipatoriamente, aunque su uso produzca respuestas sesgadas y limitadas la mayoría del tiempo. Por lo anterior, si se quiere completar una tarea, resolver un acertijo o tomar una decisión simple, ello se hará mediante la vía que represente el menor esfuerzo físico y cognitivo posible.

En consecuencia, el consumo de energía siempre se ha asumido aversivo, aquello que una persona busca activamente evitar porque le causa dolor o sensaciones displacenteras. Un ejemplo evidente de una situación aversiva es quemarse la mano cuando se cocina en la estufa. Quien se ha quemado con fuego en alguna ocasión evitará acercarse mucho a él ante la posibilidad de herirse otra vez. Asimismo, una de las repercusiones de la aversión es la disminución de las conductas asociadas a ella —quien se

quemó por cocinar mientras veía la televisión, posiblemente deje de verla y ponga mayor atención cuando cocine en ocasiones posteriores—. Por esta razón, psicólogos, neurocientíficos y cualquier investigador destinado a estudiar la cognición humana asumen que el consumo de energía resulta aversivo. Por el simple hecho de que lo evitamos.

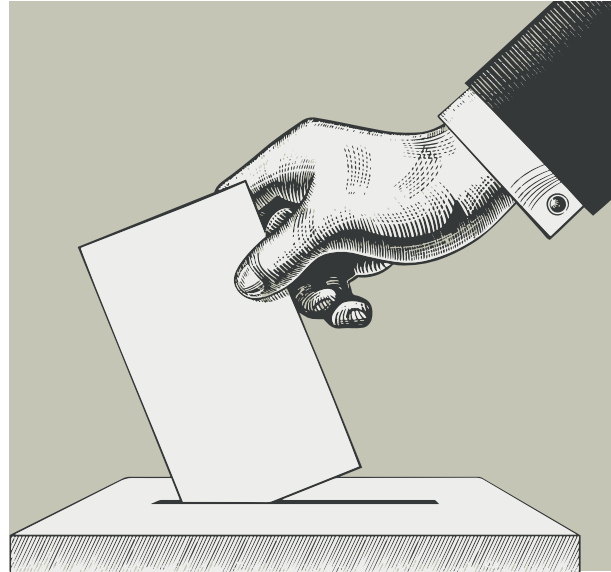
¿Siempre hemos huido del esfuerzo mental?

 David y cols. (2024) se preguntaron: ¿el esfuerzo cognitivo es realmente *aversivo*? Los autores argumentaron que, hasta el momento, no existía una medición directa que demostrara que el esfuerzo representa algo negativo. Incluso retomaron ejemplos de la vida cotidiana en donde las personas desean involucrarse en actividades que requieren una cantidad considerable de esfuerzo, como los jugadores de ajedrez, que memorizan patrones del tablero y anticipan jugadas sin necesidad de estar compitiendo por un premio.

Para responder a su pregunta, los autores realizaron un metaanálisis —investigación que combina los resultados de múltiples estudios— con el objetivo de hallar congruencia en los resultados científicos. Reunieron los datos de 308 tareas experimentales y las codificaron conforme a tres tipos de variables moduladoras: experiencia previa de los participantes, cualidades propias de la tarea experimental y variables misceláneas —por ejemplo, género y edad de los participantes—. La razón por la que incluyeron estas clasificaciones fue para comprobar si alguna de éstas modulaba la relación entre el esfuerzo cognitivo y su aversión; ya que pudiera ser que el primero se considerara desagradable, pero únicamente para ciertas personas o en situaciones específicas. Sin embargo, ninguna de estas clasificaciones tuvo tal efecto. Es más, a lo largo de las 308 tareas experimentales, hubo una fuerte correlación entre el esfuerzo mental y el afecto negativo.

El estudio anterior confirmó las sospechas prevalentes por décadas. Si evitamos el esfuerzo cognitivo, es para ahorrarnos una mala experiencia, y si lo afrontamos, es para obtener una recompensa que reduzca su costo. Esta relación aparentemente sencilla

se verá afectada si consideramos ahora que el tiempo que tarda una consecuencia en aparecer afectará el valor subjetivo que una persona le asignará. Lo anterior se conoce como descuento temporal e ilustra el dilema entre la impulsividad y el autocontrol: ¿somos capaces de elegir una recompensa mayor, pero retardada, en lugar de una recompensa menor pero inmediata? Si debemos esperar meses o años para observar la consecuencia de nuestras decisiones, no seremos capaces de contemplar objetivamente su valor. Rápidamente perderemos motivación para llegar al mejor resultado y, en consecuencia, se verá mermada nuestra atención y el tiempo que le dedicaremos a esta tarea disminuirá drásticamente.



■ El esfuerzo mental en la democracia

Ahora bien, cabe preguntarnos por las implicaciones de los resultados anteriores para el establecimiento, operación y conservación del sistema democrático, acerca de lo que implica que quienes participan en él sean aversos a los esfuerzos intelectuales requeridos para darle existencia y continuidad.

La democracia es un concepto complejo que, de manera general, admite dos grandes concepciones. Por una parte, la llamada “procedimental”, consistente en su reducción a los procesos de votación para elegir a los representantes populares. Por otra parte, la denominada “sustantiva”, entendida no sólo como el conjunto de procedimientos electorales, sino también de los derechos, prerrogativas e instituciones necesarias para que los votantes puedan tomar decisiones informadas en un contexto de tranquilidad y certidumbre.

En cualquiera de estas dos acepciones, y si bien con distintos grados de intensidad, los votantes tienen que realizar importantes esfuerzos para involucrarse. Pensemos en la condición del ciudadano promedio en el modelo procedimental. El potencial votante tiene que obtener el documento mediante el cual pueda ejercer su voto; analizar las propuestas de los distintos partidos políticos; contrastar la información que hubiere obtenido con la que provenga de otros partidos y candidatos; valorar el reparto de sus votos conforme a sus preferencias; optar por el

partido A o por el B, o por los candidatos Y o Z; identificar la casilla a la que deberá acudir el día de la elección, y asistir a depositar su voto. Todo lo anterior requiere un gran esfuerzo cognitivo.

Este ejercicio se realiza en una condición dinámica en la que los intereses, sesgos, opciones e incertidumbres están produciendo ajustes constantemente. Un elector razonablemente interesado no tomará una decisión inamovible, sino que la irá ajustando a lo largo del proceso con base en la información recibida en forma de plataformas políticas, propuestas –partidistas o de candidatos–, sondeos de opinión o resultados de los debates. Esta caracterización dinámica provoca que el potencial votante tenga que realizar una inversión constante de tiempo, dinero y esfuerzo a lo largo de varias semanas o meses.

Las operaciones que se acaban de señalar se complican aún más si nos colocamos en el supuesto sustantivo de la democracia. El ciudadano que, por decirlo así, asume este modelo tiene que obtener información y realizar un número mucho más amplio de operaciones a efecto de no sólo pensar y actuar en términos estrictamente electorales, sino también de considerar la manera en la que, mediante su voto y su actividad pública, habrá de participar en un mucho más amplio y complejo entramado institucional. Por ejemplo, tendrá que considerar la manera en la que los resultados de los procesos electorales pueden

incidir en la división de poderes, la legalidad, los derechos humanos u otros factores semejantes.

El ejercicio electoral exige de sus participantes un importante esfuerzo cognitivo. No es posible, dicho de otra manera, tomar decisiones mínimamente informadas si no se acumuló y discriminó previamente información específica. Dados estos requerimientos, resulta importante preguntarnos por las condiciones y los resultados de no emprender esos esfuerzos cognitivos. Ante la dificultad de obtener información pertinente por la aversión al esfuerzo cognitivo, es altamente posible que el voto termine delegándose en otras personas: sea un partido político, un candidato o abstenerse y ceder ante la mayoría.

Obtener información para votar tiene sus dificultades en cualquier tiempo histórico, con independencia de lo estático o tradicional que pueda ser o parecer. Aun en situaciones de bipartidismo, razonable institucionalidad y predictibilidad de los resultados, los potenciales votantes tienen que allegarse información para definir la manera en que sus intereses o expectativas puedan satisfacerse de mejor manera al votar por uno u otro candidato o partido. Más aún, el voto se emite en situaciones de incerti-

dumbre con respecto del agregado total. Por ejemplo, pensemos en un momento histórico como el que se vivió en el periodo de entreguerras mundiales o el que actualmente vivimos en muchos países del mundo. El ciudadano promedio tiene que decidir no sólo entre su preferencia inmediata, sino también considerar lo que podría suceder para él y su grupo de pertenencia si otras opciones resultaran triunfantes, así como la manera en la que el voto resultante en su país se vería afectado por las condiciones geopolíticas que están sucediendo a su alrededor. En situaciones más lamentables, como en contextos de disputa o riesgo, también es necesario luchar contra las descalificaciones, oposiciones o francas mentiras provenientes de los grupos inmersos en la disputa electoral.

En estas condiciones de particular incertidumbre, el esfuerzo cognoscitivo puede llegar a ser adverso o de plano doloroso. La cantidad de operaciones intelectuales a realizar a lo largo de un arco temporal más o menos prolongado resulta ardua y costosa. Es difícil suponer que el elector promedio pueda mantener su interés y su disposición de un modo continuado, incorporar nuevas variables y hacer las correcciones que le permitan tomar, dicho de manera abreviada, una decisión ilustrada. Todo ello en momentos en los que, además, existen severas críticas sobre la racionalidad y sus valores.



¿Cómo evitamos el esfuerzo mental en la democracia?

Si este escenario es correcto, surge una pregunta relevante para la comprensión del juego democrático mismo: ¿cómo se decide ejercer el voto y, más ampliamente, participar en democracia, cuando las condiciones de incertidumbre impuestas por la realidad misma, o por el propio proceso político, exigen grandes costos cognitivos?

Aunque en los sujetos actuantes sea posible identificar una pluralidad, finalmente guardan cierta unidad en su agrupamiento. Es posible postular que, en algunos contextos, tanto el manejo de la incertidumbre como, correlativamente, el evitamiento del esfuerzo intelectual, se delegan en un grupo, persona,

tradición o ideología, a fin de que sea otro el que termine decidiendo.

Lo anterior plantea algunas hipótesis. Si, primero, existe tal correlación entre esfuerzo, incertidumbre, aversión, participación y delegación. Segundo, si, en caso de existir, hay niveles de intensidad entre las condiciones de participación y los grados de delegación. Y, tercero, si es posible identificar algunos elementos constantes que los sujetos delegan y a los cuales dan mayor peso, a partir de los diversos niveles de correlación.

Finalmente, ¿qué podríamos hacer para salvaguardar las mecánicas democráticas o, al menos, asegurarnos de que cumplen su función? Un posible camino —que se abre al entender los distintos elementos que juegan un papel en esta compleja interacción— consistiría en enfocar los procesos democráticos en los elementos que podrían ayudar a sobrellevar el trabajo implicado. Tal como los jugadores de ajedrez que mantienen la atención en las recompensas prometidas, se podrían implementar estrategias para facilitar que el votante promedio elija tomar el camino más arduo, pero más benéfico para él y para el país a largo plazo. Son necesarios, todavía, muchos cuestionamientos y estudios para llegar a tal punto. Si queremos sobreponernos a aquellos elementos que obstaculizan un ejercicio democrático ideal en nuestro país, necesitamos mirar más allá del esfuerzo cognitivo implicado.

José Ramón Cossío Díaz

El Colegio Nacional e Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
jrcossio@tec.mx

Herson García Gallegos

Facultad de Psicología, Universidad Nacional Autónoma de México.
hersongg_29.97@comunidad.unam.mx



Referencias específicas

David, L., E. Vassena y E. Bijleveld (2024), “The unpleasantness of thinking: A meta-analytic review of the association between mental effort and negative affect”, *Psychological Bulletin*, 150(9):1070-1093.

Lecturas recomendadas

- Applebaum, A. (2024), *Autocracia S. A. Los dictadores que quieren gobernar el mundo*, Barcelona, Debate.
- Diamond, L. (1999), *Developing Democracy Toward Consolidation*, Estados Unidos, The Johns Hopkins University Press.
- Gray, J. (2024), *Los nuevos leviatanes: reflexiones para después del liberalismo*, Madrid, Sexto Piso.
- Krastev, I. y S. Holmes (2019), *La luz que se apaga: cómo Occidente ganó la Guerra Fría pero perdió la paz*, Barcelona, Debate.
- Przeworski, A. (1999), “Minimalist conception of democracy: a defense”, en I. Shapiro y C. Hacker-Cordón (coords.), *Democracy's Value*, Estados Unidos, Cambridge University Press, pp. 23-55.
- Schumpeter, J. (1942), *Capitalism, Socialism and Democracy*, Estados Unidos, Harper Torchbooks.

La conspiración del silencio: mentir u ocultar la verdad

El dilema acerca de mentir, ocultar o decir la verdad se pone de manifiesto de manera muy frecuente en el ámbito familiar cuando algún miembro es diagnosticado con una enfermedad grave, como el cáncer en etapa terminal. La relación médico-paciente-familiar se puede ver afectada, entre otros aspectos, por dificultades en la comunicación que pueden derivar en el fenómeno de la *conspiración del silencio*, tema de este trabajo.

Mentir u ocultar la verdad, ¿conceptos iguales o diferentes?

El tema de mentir, ocultar o decir la verdad genera mucha polémica. En el argot popular es muy frecuente escuchar frases como “Prefiero una verdad que duela a una mentira que ilusione y me haga feliz”, “Una verdad a medias es la mentira más cobarde”, “Ocultar también es mentir”, “Duela o no, la verdad es muy necesaria”, y muchas otras que puede ser que hayas escuchado. En la vida las personas pueden enfrentarse a circunstancias en las que no saben si expresar la verdad es la mejor decisión por temor a las consecuencias. En este artículo se comenta tal conflicto, especificando cómo esto puede afectar la comunicación en la familia en casos como la noticia de un diagnóstico de enfermedad terminal. A modo de reflexión y para que comprendas hacia dónde se dirige el análisis, te proponemos que te preguntes si consideras que es lo mismo mentir que ocultar la verdad.

En el debate sobre si ocultar la verdad es también mentir, se pueden encontrar criterios distintos: algunos concuerdan en que una conlleva a la otra, otros plantean que son lo mismo, y otros más consideran que son dos cuestiones diferentes. El hecho de elegir una u otra perspectiva constituye una decisión difícil cuando la persona desea decir la verdad, pero sabe que esto puede ocasionar reacciones no deseadas que no sabe cómo manejar. La **Figura 1** representa gráficamente a una persona pensando si debe decir la verdad o mentir, de manera completamente consciente y como consecuencia de una intención que genera preocupación, incertidumbre y temores que hacen que la decisión sea más difícil de tomar. Por ende, cuando la situación es muy complicada y el sujeto no sabe manejarla adecuadamente, puede elegir ocultar la verdad como alternativa a decir la verdad.





Figura 1. Difícil decisión: ocultar la verdad o mentir. Ilustración: Andrea Hernández Rangel.

Ocultar y mentir son dos conceptos diferentes, para entenderlos mejor veamos la definición de éstos.

La mentira es una expresión o manifestación contraria a la verdad, a lo que se sabe, se cree o se piensa, y es utilizada para simular, fingir, engañar, aparentar, persuadir o evitar situaciones.¹ Mentir en realidad va mucho más allá de un comportamiento negativo y no deja de ser un acto voluntario y consciente, en la mayoría de los casos. Esto se relaciona en la sociedad con la moralidad y se tiende a juzgar negativamente a las personas mentirosas; por tanto, se asume que una persona que dice mentiras es malévola o tiene malas intenciones. Para no generalizar y evitar estas etiquetas negativas, se comenzaron a usar términos como “mentiras piadosas” para justificar determinado tipo de mentira, como un acto de buena fe en el cual supuestamente no se miente por maldad, sino para evitar un disgusto; o sea, se miente con intención benevolente y de este modo se llega a creer que es necesario y perdonable. Lo mismo sucede con términos como “mentiras blancas” y “mentiras honestas”, utilizados con el fin de justificar algo

olvidado, como cuando se narra un acontecimiento de modo poco preciso.

Existen diversos tipos de mentiras, además de las mencionadas, como el “autoengaño”, las “promesas rotas”, las “mentiras instrumentales”, la “exageración”, el “plagio” o las “mentiras compulsivas”. Se puede mentir incluso cuando comunicamos algo que es falso y erróneo, pero desconocemos que lo es; en este caso, no se es consciente de la mentira, a diferencia de los otros casos señalados antes, donde se dicen mentiras propositivamente. La mentira, dependiendo de su gravedad, puede afectar las relaciones interpersonales y a la persona en sí cuando se convierte en una práctica frecuente.

Cuando se dice una mentira de importancia o de gran magnitud para otros, al ser descubierta, puede generar un gran impacto emocional (surgen preocupaciones de ser descubierto, temor a olvidar lo que se dijo, un estado de alerta por la sensación de amenaza permanente) y, por consiguiente, se pierde la libertad de actuar libre y tranquilamente. En la mentira los detalles no existen, por tanto, cuando se cuenta algo una y otra vez se omiten detalles y se expresan versiones diferentes. Una mentira lleva a otra y a otra, en forma de bola de nieve que se va agrandando.

Por otro lado, si se analiza el significado de *ocultar*, se describe como el acto de callar conscientemente lo que se podría o debería decir; o disfrazar la verdad, excluir y contener algo que no se manifiesta a todos.² La cuestión de ocultar puede llevar a la mentira, aunque no siempre. En determinadas ocasiones se hacen preguntas generales y la persona se limita a responder únicamente lo que preguntaron y omite los detalles; sin embargo, cuando la pregunta es muy específica y requiere como respuesta un dato que no se desea compartir, tiene lugar la mentira.

También puede ocurrir que no se pregunte y que, de igual modo, se oculte algo que se debería decir obligatoriamente. Supongamos que conoces a alguien y no te cuenta que nunca ha conocido a sus padres biológicos; quizás te enteras y no te afecta porque no era relevante para ti saberlo; y para él

¹ Según el *Diccionario de la lengua española* [en línea], RAE: <<https://dle.rae.es/mentira?m=form>>.

² *Diccionario de la lengua española* [en línea], RAE: <<https://dle.rae.es/ocultar?m=form>>.

tampoco era necesario brindarte esa información. Por otro lado, si esa misma persona no te cuenta que tiene otra pareja además de ti, ahí habría un problema, pues te está ocultando algo que te afecta y que tienes derecho de saber para tomar la decisión de continuar o no con esa persona.

Ocultar la verdad puede perturbar la moral ante los demás. Por ejemplo, si trabajas en una empresa y te ausentas algunos días necesitas dar información de las causas de tu ausencia, no ocultarla. Si vives con tu pareja, hijos u otros familiares y piensas que para evitar un conflicto es mejor ocultar cosas, te comunicamos, estimado lector, que es posible que se generen otros problemas. Entonces, habrás llegado a la conclusión de que mentir y ocultar no es lo mismo, pero van de la mano.

Elegir entre decir u ocultar la verdad ante problemas de la vida

Forma parte de la labor de los profesionales de la psicología, en el contexto clínico, ofrecer atención a personas con condiciones variables de salud y diagnósticos de enfermedades como el cáncer. También pueden dar orientación psicológica a sus familiares, en caso de requerirlo. En muchos casos de enfermedad en estadio final o grave, los miembros de la familia preguntan si se debe decir la verdad, pues consideran que puede empeorar la situación del paciente. Los familiares se ven entonces sumergidos en un gran laberinto donde no identifican cuál es el camino correcto. Es como querer resolver un problema de geometría sin saber las leyes y teoremas de matemáticas; sin embargo, no es tan complejo saber qué hacer, se trata sólo de conocer las consecuencias de decir la verdad y de mentir.

Cuando en una familia se diagnostica a unos de sus miembros con cáncer en etapa terminal, o cualquier otra enfermedad grave, y los médicos no ofrecen esperanza de vida, es muy frecuente que el cuidador o ser querido prefiera ocultarle al enfermo ese diagnóstico en acuerdo mutuo con el personal de salud (médico, enfermeras). O sea, todos saben que la persona tiene cáncer menos ella; es aquí donde se desencadenan las consecuencias de ocultar la ver-



dad. Estas dificultades en la comunicación pueden afectar la relación médico-paciente-familiar.

¿Por qué ocultar la verdad ante un diagnóstico crítico? La respuesta a esta pregunta se asocia a un modo de afrontar el proceso de enfermedad. Tiene que ver principalmente con el manejo de la información cuando existen bajas posibilidades de curación o cuando existe la probabilidad de una muerte inminente. El problema de la comunicación se relaciona con el hecho de no dar la información que se conoce sobre el diagnóstico (enfermedad) y el pronóstico (estimación de lo que ocurrirá durante la enferme-

dad). Éstos se ocultan por miedo a las consecuencias negativas que puede generar la comunicación del estado real. Existe la creencia de que de esta manera se protege a la parte que no conoce la verdad, para no herirla, evitarle sufrimiento o sentimientos de desesperanza y culpa (Font-Ritort y cols., 2016). ¿Sabes cómo se le conoce a este fenómeno de ocultarle la verdad a una persona respecto a su enfermedad? Se le conoce como conspiración del silencio (cs).

Definición de la cs

A continuación, se señalan otros detalles sobre el tema. La cs es un acuerdo tácito entre cuidadores primarios (familiares, amigos, persona que normalmente cuida) o el personal de salud que interviene en el proceso de tratamiento del paciente, para omitir o cambiar información con el objetivo de ocultarle el diagnóstico de una enfermedad y el pronóstico, por lo general negativo (Espinoza-Suárez y cols., 2017). En la **Figura 2** se observa cómo la doctora, en este caso, le comunica algo al familiar a espaldas del paciente.

Esta cs, como bien se plantea, es un pacto entre dos o más personas. En la mayoría de los casos

es una petición de la familia a los médicos, quienes también pueden considerar aceptar este pacto como una opción en ocasiones más fácil que decirle la verdad al paciente, ya que así se podría evitar malestar emocional.

La cs también surge cuando tanto el paciente como la familia conocen la situación real de la enfermedad y todos evitan hablar de ello, como una forma de negación (rechazar la existencia de un problema, no enfrentar la realidad de manera directa) y por temor de dañarse mutuamente. En algunos casos, muchas de las personas con una enfermedad terminal adoptan una actitud de negación simulando que no quieren conocer su diagnóstico o pronóstico.

Clasificación

Es un tema muy interesante sobre el que vale la pena profundizar para comprenderlo con claridad. La cs es un problema bastante frecuente en nuestro medio. Después de leer este artículo podrás identificarlo fácilmente en cualquier contexto donde se manifieste. Se puede clasificar la cs atendiendo al conocimiento de la información disponible (parcial y total) y según el causante (como adaptativa o desadaptativa).

Clasificación de la conspiración del silencio según el conocimiento de la información disponible		
	Parcial	Total
Diagnóstico	Se conoce	No se conoce
Pronóstico	No se conoce	No se conoce
Clasificación de la conspiración del silencio según el causante		
	Desadaptativa	Adaptativa
Paciente	—	Causante
Familiar	Causante	—
Personal de salud	Causante	—

Se considera parcial cuando el paciente conoce sólo el diagnóstico, y total cuando el paciente no conoce ni el diagnóstico ni el pronóstico. Es desadaptativa cuando el paciente quiere saber y pregunta, pero su familia o el profesional le niegan la información, y adaptativa cuando tiene como base la necesidad del paciente de no querer saber lo que está ocurriendo, como se representa en la **Figura 3** (Guilarte y cols., 2016).



Figura 2. Conspiración del silencio desadaptativa: el personal de salud y el familiar le ocultan información al enfermo. Ilustración: Andrea Hernández Rangel.

Factores causantes y consecuencias

En la literatura se puede apreciar que la cs ha perdurado a lo largo de los años, antes con mayor énfasis que en la actualidad, pero la realidad es que sigue siendo muy frecuente. Por ejemplo, Arranz y Bayes (1996) estudiaron una muestra de 96 pacientes de cáncer avanzado y hallaron que el 22 % declaraban conocer el diagnóstico completo, incluida la localización del tumor; el 24 % tenía información parcial, sabía que se trataba de un cáncer, y el 54 % aseguraba un diagnóstico distinto de cáncer.

Centeno y Núñez (1994 y 1998) evidenciaron que el diagnóstico le era revelado al 25-50 % de los enfermos de cáncer con la certeza de que la información no era del todo real. Estos autores señalaron que uno de cada tres enfermos estudiados decía no saber lo que tenía; otro sospechaba su enfermedad, pero no la había confirmado, y el tercero sabía con certeza que su enfermedad era un tumor maligno o cáncer.

Fumis y cols. (2012) evidenciaron, en un estudio realizado con 202 oncólogos, 150 pacientes con cáncer y 150 familiares, que un 79.2 % de los médicos y un 74.7 % de los familiares consideraron que el paciente no debería saber sobre su estado terminal; sin embargo, el 92 % de los enfermos con cáncer plantearon la necesidad de conocer su estado real. O sea que dichos pacientes prefirieron saber sobre su pronóstico, por encima del criterio de los médicos y sus familiares.

Otros autores (Bermejo y cols., 2013) estudiaron el grado de conocimiento que tenían pacientes y familiares sobre el diagnóstico y pronóstico de la enfermedad terminal al ingreso y al alta, en una unidad de cuidados paliativos, para cuantificar la existencia de cs. Al ingreso, la tasa de desconocimiento del diagnóstico fue de un 14 %, y del pronóstico de un 71 %. Al alta, las tasas de desconocimiento del diagnóstico disminuyeron al 8 % y de pronóstico al 57 %. Alrededor del 50 % de los pacientes tanto al ingreso como al alta no habla, niega, o evita, mientras que alrededor del 40 % no muestra actitud contraria a la información. Un 55 % de los familiares quiere proteger al enfermo y un 35 % no manifiesta una actitud contraria.



Figura 3. Conspiración del silencio adaptativa: el enfermo evita escuchar o hablar sobre su diagnóstico y pronóstico. Ilustración: Andrea Hernández Rangel.

Todos estos datos muestran que efectivamente la cs sigue siendo una práctica bastante frecuente en nuestro entorno. Varios autores hacen referencia a que existen factores que influyen en la aparición de este fenómeno. Ruiz-Benítez (2009) hizo una clasificación de los factores de riesgo para la cs. A continuación se describen algunos.

Las repercusiones de la verdad. Definidas como el miedo a las consecuencias negativas en el enfermo, resultado de la revelación de la verdad, tales como: depresión, pérdida de interés por la vida, locura, empeoramiento del estado físico, sufrimiento innecesario, entre otros. Cuanto mayor sea la creencia de que la verdad va a tener repercusiones negativas en el enfermo, mayor es la incapacidad para comunicarse.

El desbordamiento emocional. Se refiere a la sobrecarga emocional que resulta difícil de controlar y que implica a aquellas personas que son vencidas por la negatividad, lo que impide oír sin distorsiones el mensaje recibido, organizar los pensamientos y responder con claridad. Se plantea que un mayor desbor-

damiento emocional suele acompañar a una menor competencia para manejar los aspectos relacionados con la enfermedad o la muerte. Por otra parte, cuanto mayor es el miedo y la evitación hacia la muerte, mayor suele ser el desbordamiento emocional.

Las dificultades de comunicación con el enfermo. Consideradas como la falta de preparación o capacidad para manejar temas relacionados con la enfermedad y la muerte del ser querido. Cuando esto ocurre se puede identificar menor percepción de competencia ante la muerte por parte de los familiares; es decir, que estas personas se perciben gradualmente con menor capacidad para afrontar la muerte del ser querido, y así lo demuestran sus actitudes y creencias al respecto.

El apoyo en las creencias religiosas. Se refiere al acercamiento a la religión o el desarrollo de la religiosidad previamente existente como una forma de afrontar situaciones estresantes, permitiéndole adoptar un sentido de coherencia que como recurso general de resistencia favorece su salud.

La competencia ante la muerte. Se afirma que a lo largo de la vida las personas no se entrenan ni desa-

rollan habilidades ante la enfermedad y la muerte; por lo que generalmente mientras mayor es la falta de competencia ante la muerte, menor es la capacidad de comunicación acerca de ella.

Por otro lado, Ruiz-Benítez (2009) menciona que la edad del paciente es otro factor que influye en la cs. Se observa que, a mayor edad, mayor es el número de conspiradores. También refiere que el género no influye, pues tanto hombres como mujeres conspiran sin diferencias significativas. Sin embargo, en su estudio se evidencia una fuerte relación entre la cs y el nivel educativo. Los resultados demuestran que cuando el paciente y acompañante tienen estudios de bachillerato o más altos, la frecuencia relativa con la que conspiran es del 47 %, mientras que cuando no alcanzan este nivel educativo se conspira en un 93 % de los casos.

En esta conspiración resultan todos afectados, pero los que sufren las mayores consecuencias son los pacientes. Cuando la cs surge por parte de los familiares y del personal de salud, los pacientes pueden sentirse abandonados, incomprendidos o engañados, pues pueden llegar a percibir como algo negativo el



comportamiento de los otros para evitar hablar de la enfermedad delante de ellos. Cuando esto ocurre, el paciente puede presentar síntomas de ansiedad o depresión, con componentes importantes de miedo e ira. Esta situación de ignorancia de su diagnóstico o pronóstico les impide tomar decisiones en cuanto a la solución de situaciones significativas para ellos; por tanto, experimentan un estado de angustia grave que lleva al aislamiento y que puede empeorar los síntomas físicos.

¿Qué tipo de decisiones necesitan tomar las personas con una enfermedad terminal? En cualquier caso, cuando la familia le oculta al enfermo que tiene una enfermedad terminal –sea cáncer en último estadio u otra–, lo está privando no sólo del derecho a saber que va a morir, sino del derecho a elegir qué desea hacer en sus últimos días. Por ejemplo, despedirse de sus amigos, tener cerca a las personas que quiere, tomar la decisión de qué hacer con sus objetos, tener asuntos económicos arreglados, en caso de ser posible ser donante de órganos, disfrutar de lo que más le gusta; en fin, de expresar y cumplir sus últimas voluntades.

A modo de conclusión, se puede decir que ocultar la verdad no es la mejor opción, ni tampoco es una buena decisión en situaciones delicadas como una enfermedad terminal. No se debe decidir por otra persona, quien tiene derechos y necesidades que satisfacer mientras tenga vida. Finalizamos con la siguiente frase que manifiesta la voluntad de toda persona que desea conocer la verdad: “Háblame siempre con la verdad; probablemente no me guste o no sepa manejarla, pero déjame ser yo quien decida qué hacer con ella”.

Kenlys Vera Rodríguez

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
kenlysyera@gmail.com

Roberto Oropeza Tena

Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
roberto.oropeza@umich.mx

Referencias específicas

- Arranz, P. y R. Bayes (1996), “Aspectos psicológicos del enfermo en situación terminal”, en M. González, A. Ordóñez, J. Feliú, P. Zamora y E. Espinosa (comps.), *Tratado de medicina paliativa*, Madrid, Médica Panamericana, pp. 237-255.
- Bermejo, J. C., M. Villacieros, R. Carabias, E. Sánchez y B. Díaz-Albo (2013), “Conspiración del silencio en familiares y pacientes al final de la vida ingresados en una unidad de cuidados paliativos: nivel de información y actitudes observadas”, *Medicina Paliativa*, 20(2):49-59.
- Centeno, C. y J. M. Núñez (1994), “Questioning diagnosis disclosure in terminal cancer patients: a perspective study evaluating patient’s responses”, *Palliative Medicine*, 8(1):39-44.
- Centeno, C. y J. M. Núñez (1998), “Estudios sobre la comunicación del diagnóstico del cáncer en España”, *Medicina Clínica*, 110(19):744-750.
- Espinoza-Suárez, N. R., C. M. Zapata del Mar y L. A. Mejía (2017), “Conspiración de silencio: una barrera en la comunicación médico, paciente y familia”, *Revista de Neuro-Psiquiatría*, 80(2):125-136.
- Font-Ritort, S., J. Martos-Gutiérrez, M. Montoro-Lorite y L. Mundet-Pons (2016), “Calidad de la información sobre el diagnóstico al paciente oncológico terminal”, *Enfermería Clínica*, 26(6):344-350.
- Fumis, R. R. L., B. de Camargo y A. del Giglio (2012), “Physician, patient and family attitudes regarding information on prognosis: a Brazilian survey”, *Annals of Oncology*, 2: 205-211.
- Guilarte, X. C., C. R. V. García-Viniegras y B. B. L. González (2016), “Conspiración de silencio en familias de pacientes oncológicos en etapa terminal”, *Revista del Hospital Psiquiátrico de La Habana*, 13(1):1-10.
- Ruiz-Benítez, M. A. (2009), *La conspiración del silencio en los familiares de los pacientes terminales*, tesis doctoral, Universidad de La Laguna, repositorio institucional. Disponible en: <<https://riull.ull.es/xmlui/handle/915/9608>>, consultado el 21 de abril de 2025.

De actualidad

Desde la UAM

Noticias de la AMC





Las herramientas del lenguaje y escritura automatizada de la inteligencia artificial perjudican la formación científica

El desarrollo de la inteligencia artificial es sorprendente. Sin embargo, el uso de las herramientas de manejo del lenguaje y escritura automatizada de la inteligencia artificial tiene un impacto negativo en la formación académica de estudiantes de posgrado en ciencias. Su uso repercute en –y reduce– habilidades que ellos deben poner en práctica, desarrollar y perfeccionar para un exitoso desempeño profesional.

Introducción

En la última década diferentes aplicaciones que utilizan la inteligencia artificial (IA) se han involucrado en nuestras vidas, sobre todo a través de computadoras, dispositivos electrónicos, teléfonos móviles y tabletas. La IA se refiere específicamente a sistemas de *software* (y en algunos casos *hardware*) dentro del campo de la informática, diseñados para realizar tareas que por lo general requieren de la inteligencia humana, como el aprendizaje, el razonamiento y la percepción, e incluso la producción de trabajos creativos como dibujos, imágenes o música. La IA se crea con la intención de imitar e idealmente mejorar el pensamiento humano. Los actuales sistemas computarizados, mediante algoritmos y modelos matemáticos, en tan sólo segundos analizan y procesan grandes cantidades de datos e información disponible, resuelven sobre el conocimiento y toman decisiones basadas en patrones y reglas establecidas a través del aprendizaje automático para lograr un objetivo dado; son algoritmos que mejoran automáticamente a través de la experiencia. La máquina tiene la capacidad de aprender de forma autónoma sin ser específicamente programada para hacerlo. Así, progresivamente la IA mejora su precisión y eficiencia, aunque no siempre resulta 100 % acertada, ya que los análisis que realiza se basan en información disponible en internet, y muchas veces estos datos no son del todo verídicos, por lo que pueden generarse respuestas sin sentido –conocidas como “alucinaciones”–, puede haber

errores en las citas, alucinación de hechos, sin una distinción entre la información autorizada o fidedigna y los rumores, y sin transmitir con precisión esa incertidumbre. Así que, si existe información falsa o imprecisa, la IA puede identificarla como verdadera y equivocar su decisión o argumentación.

La IA ahora está en todos los campos de nuestra vida y la utilizamos aun sin darnos cuenta, principalmente en la ciencia, la ingeniería y la tecnología, pero también está muy presente en la educación a través de sistemas de aprendizaje automático y producción de algoritmos; además de en redes sociales, en motores de búsqueda de información, en el reconocimiento facial o de voz, en los traductores de idiomas, en bancos y supermercados, en las compras en línea, en asistentes virtuales, en aplicaciones de teléfonos móviles, en la salud, la industria, la administración pública, en el transporte, en los sistemas de vigilancia y seguridad, etc., etc. La IA sintetiza y automatiza tareas que en principio son intelectuales, por lo que resulta relevante para cualquier actividad intelectual llevada a cabo por humanos; es decir, tiene un alcance evidentemente global.

El objetivo particular de este artículo es evidenciar el impacto del uso de herramientas de la IA (específicamente las de manejo del lenguaje, análisis y escritura automática) en la formación académica de estudiantes de posgrado en ciencias. Este artículo no pretende hacer un análisis de los alcances de la IA en toda su extensión, ni profundizar en sus diferentes tipos de programas, sus ventajas o desventajas,

ya que son muy amplios, complejos y con enormes aplicaciones en nuestra vida cotidiana y profesional; la intención es exponer una problemática actual en la formación de futuros científicos.

La IA en la educación

Aunque la aplicación de la IA en la educación se presenta como uno de los avances más importantes del siglo, con inmensas aplicaciones y ventajas, en este momento quiero abordar un tema específico que puede resultar preocupante y polémico: el aumento de su uso por estudiantes de educación superior y su impacto, particularmente en la formación académica de estudiantes de maestrías y doctorados en ciencias, aunque también en áreas de ciencias sociales, humanidades y otras. Me refiero específicamente a las herramientas de manejo del lenguaje, análisis y escritura automática (en adelante nos referiremos a estas herramientas de escritura como HEA), como el ChatGPT, Copilot-Microsoft, Claude 3, Deep Research, GPT-4, Google Gemini, Aithor, Skaya, StudyTexter, etc. Desafortunadamente, su uso indiscriminado por los estudiantes en formación puede ser contraproducente, ya que las múltiples versiones de instrumentos de escritura y elaboración de ensayos, reportes y resúmenes repercuten directamente sobre estas habilidades que los estudiantes deben desarrollar. Las HEA de la IA pueden ser excelentes instrumentos que facilitan la investigación y la búsqueda de información, automatizan tareas repetitivas y mejoran el aprendizaje personalizado; pero igualmente pueden ser un instrumento de engaño (y autoengaño) en la elaboración de tareas de escritura, análisis y redacción, pues actúan en detrimento de la formación del estudiante y perjudican específicamente el desarrollo de habilidades que el alumno debe adquirir, practicar y perfeccionar para el futuro desempeño de su profesión. Entiéndase que el uso de esas herramientas de análisis y escritura automáticas de la IA no beneficia el desarrollo de estas habilidades en la formación de estudiantes, situación que he observado en los últimos años en trabajos presentados por algunos alumnos de nuestro programa de posgrado, y lo hemos comentado entre colegas. Desa-



fortunadamente, estos acontecimientos son recientes y no hay estudios comparativos que lo demuestren; sin embargo, son una realidad y preocupante, que amerita atención y futuros estudios científicos.

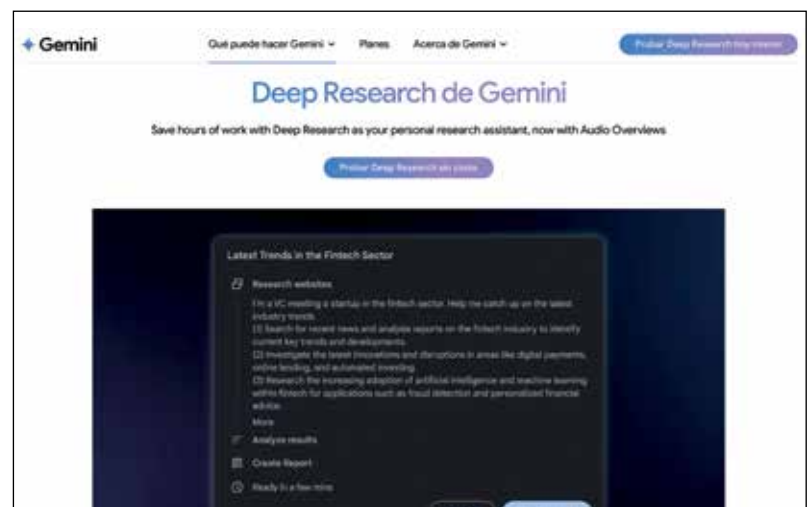
■ La IA en los programas de posgrado

■ El objeto de un posgrado en ciencias (maestría o doctorado) es la formación académica de futuros científicos investigadores, cuya principal labor profesional será la profundización en temas de ciencia, la generación de conocimientos, el diseño de experimentos y, en particular, la escritura, redacción y publicación tanto de artículos para revistas internacionales especializadas de alto impacto, como artículos de divulgación para un público no especializado. Estos futuros profesionistas, investigadores en formación, durante su paso por un programa de posgrado deben adquirir y evidenciar diversas habilidades, como la demostración o refutación de hipótesis mediante métodos teóricos, analíticos o experimentales, el uso de fórmulas para la solución de ciertos problemas, la medición de variables y su descripción por métodos cuantitativos, la observación de patrones y procesos naturales y sus fenómenos para elaborar hipótesis, etc. Deberán mostrar, además, habilidades de lectura, comprensión y síntesis, sobre todo de textos científicos, y en el caso de los estudiantes cuya lengua nativa no es el inglés, eso significa que deben obtener esas habilidades con textos escritos principalmente en inglés; deben adquirir y demostrar destrezas de lectura, comprensión y escritura científica y de comunicación de las ciencias; desarrollar habilidades de pensamiento independiente y resolución de problemas, y tienen que aprender a enfrentarse a la crítica y desarrollar su capacidad autocrítica. Aprender a escribir ciencia no es una tarea trivial y requiere de mucha práctica. Ninguna de estas habilidades o capacidades se adquieren estudiando textos o artículos científicos; no se aprenden en un congreso o atendiendo a conferencias impartidas por expertos. La manera de desarrollarlas es mediante la constante práctica, ensayo y error, con la crítica constructiva de uno o varios tutores; con todo, las lecturas, la interacción con expertos y el aprendiza-

je en entornos colaborativos, sin duda contribuyen significativamente al desarrollo de estas habilidades.

Muchos cursos y seminarios de posgrado están diseñados con base en lecturas y elaboración de reportes escritos, lo cual tiene varias intenciones. Evidentemente la principal es que los alumnos obtengan el conocimiento en determinado tema, directamente de su fuente original; además, fomentar el hábito de lectura de textos científicos en inglés y la adquisición del respectivo vocabulario. Igualmente importante es la familiarización con la redacción científica, indispensable para la futura escritura de sus propios artículos. Por su parte, la elaboración de ensayos y reportes tiene como objetivo que los estudiantes practiquen y desarrollen habilidades de escritura y redacción, análisis, síntesis y comprensión de información científica. Así pues, los ensayos y reportes, además de obligarlos a leer y escribir sobre un tema, fortalecen su formación y perfeccionan el proceso de aprendizaje, de apropiación del conocimiento y memorización de conceptos y temas. Los estudiantes que elaboran sus reportes y ensayos mediante el uso de las HEA no están poniendo en práctica estas tareas (entiéndase lectura, comprensión, análisis, síntesis, redacción, incluso escritura y ortografía), por lo que éste también es un llamado de atención a los estudiantes para que se responsabilicen en el uso delicado y comprometido de las HEA.

Es claro que la IA brinda espacio de apoyo a los estudiantes mientras observan, discuten y recopilan



información en sus procesos colaborativos de construcción de conocimientos; pero al mismo tiempo es una herramienta que resuelve rápidamente tareas que los estudiantes deben solucionar mediante el uso de su inteligencia y el desarrollo de habilidades. La responsabilidad del uso indiscriminado de las HEA de la IA está exclusivamente en manos de ellos; los alumnos deben ser quienes comprendan que estas destrezas, indispensables en un investigador, las deben adquirir con trabajo, lectura, dedicación, responsabilidad, ética, disciplina y mucha práctica. Gran parte del tiempo que un estudiante dedica en su paso por un posgrado en ciencias, lo invierte en leer y escribir, leer más y volver a escribir, y releer y reescribir de nuevo (véase Hazelett, 2025). No sé si decir “desafortunadamente”, pero estas tareas las realizan magníficamente bien las HEA de la IA, y el estudiante puede pensar que se ahorra un montón de tiempo al pedirle a la máquina que le escriba su ensayo o la crítica del artículo que debe entregar la mañana siguiente. Sin embargo, él mismo se perjudica pues no está poniendo en práctica estas destrezas que debe desarrollar; además, siempre queda la duda de que si la HEA pasó por alto algún aspecto que podría despertar en nosotros alguna pregunta de investigación. El uso y dependencia excesiva de estas HEA de la IA limita el desarrollo de habilidades cruciales de resolución de problemas y pensamiento crítico (véase Ahmad y cols., 2023); en estos casos la IA afecta la autonomía y el desarrollo del alumno. Su uso excesivo no desarrolla la creatividad, la intuición, ni la

ética en la formación científica del estudiante; en cambio, sí perjudica la adquisición de estas especialidades indispensables en un futuro investigador. El uso de estas herramientas representa un importante desafío ético y de responsabilidad por parte de los estudiantes en formación, ya que muy probablemente sus profesores o tutores no detecten que las utilizó, aparte de que ese no es el trabajo del maestro. Tarde o temprano el alumno enfrentará la realidad de no haber adquirido y perfeccionado habilidades de lectura, análisis, síntesis, escritura y redacción, indispensables para el desempeño exitoso de su profesión.

Preocupaciones y desafíos

Así, los instrumentos de escritura de IA son un arma de doble filo. Representan un gran avance en apoyo de múltiples tareas que realizamos, pero pueden demeritar el desarrollo de habilidades en los estudiantes. La IA debe ser una herramienta complementaria en el proceso de enseñanza-aprendizaje; tenemos que definir responsabilidades y procedimientos claros de su uso en la formación de futuros científicos.

Como profesores, debemos abordar abiertamente el tema con los alumnos, y discutir las repercusiones relacionadas con el desarrollo y perfeccionamiento de habilidades para asegurar su adecuada formación. Debemos reflexionar y buscar un equilibrio, con ética y responsabilidad, entre el uso de la IA como herramienta educativa y el desarrollo integral de los estudiantes como científicos críticos y reflexivos. Por su parte los estudiantes tienen que desarrollar habilidades de pensamiento independiente y la resolución de problemas en un entorno impulsado por la inteligencia artificial; deben desarrollar habilidades para evaluar críticamente las fuentes de información, ya que representan la diferencia entre información verídica o ilegítima.

Claro que debemos aprovechar los motores de búsqueda de información, como Scopus, Clarivate, Web of Science, Google Scholar, pero tenemos que impulsar y alentar insistentemente a los estudiantes a no hacer uso de instrumentos de escritura y redacción de la IA, al menos mientras desarrollan y perfeccionan sus propias destrezas.



■ Recomendaciones para los estudiantes

■ A los estudiantes en formación, les recomiendo que al leer y analizar un texto, y escribir un ensayo, se esfuercen por hacerlo de su propia inspiración, que lo lean y revisen muchas veces, lo dejen “descansar” por lo menos tres días o más si es posible y lo revisen de nuevo; corrijan y reescriban, ordenen y sintetizen con una visión autocrítica, y si es posible “olvidarlo” por unos días más para repetir las revisiones y correcciones; luego busquen la opinión crítica de un par de personas conocedoras del tema: un académico experimentado daría una muy buena opinión. En la medida en que su ensayo esté mejor redactado, las observaciones de su primer revisor se enfocarán en recomendaciones técnicas en lugar de correcciones ortográficas o de redacción. Revisen con calma, detalle y humildad sus sugerencias y comentarios, y reescriban lo necesario.

Es muy atractivo y seductor usar instrumentos de escritura de la IA, pero su uso no beneficia el desarrollo de los estudiantes como futuros científicos y la adquisición de las habilidades de lectura y comprensión, escritura, síntesis y redacción que necesitan. El uso de estas HEA no fomenta la creatividad ni el pensamiento propio y sí promueve, en cambio, el

desinterés por la investigación por cuenta propia y se corre el riesgo de depender de esa tecnología. Los estudiantes de posgrados en ciencias deben reflexionar y trabajar duro en favor de su formación y su futuro profesional.

■ Conclusiones

■ El uso continuo o indiscriminado de las HEA de la IA por los estudiantes en formación en programas de maestría y doctorado en ciencias perjudica la adquisición de habilidades de escritura científica que los alumnos necesitan desarrollar a través de la práctica. Los estudiantes deben reconocer y hacerse conscientes de la importancia de no utilizar estas HEA, y hacer el esfuerzo de leer y escribir por sus propios medios. Con la práctica constante lograrán su progreso y perfeccionamiento.

Jorge Galindo-González

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada (Inbioteca), Universidad Veracruzana.

jgalindo@uv.mx

Lecturas recomendadas

Ahmad, S. F., H. Han, M. M. Alam, M. K. Rehmat, M. Irshad, M. Arraño-Muñoz y A. Ariza-Montes (2023), “Impact of artificial intelligence on human loss in decision making, laziness and safety in education”, *Humanities and Social Sciences Communications*, 10(1):1-14. Disponible en: <<https://doi.org/10.1057/s41599-023-01787-8>>, consultado el 9 de abril de 2025.

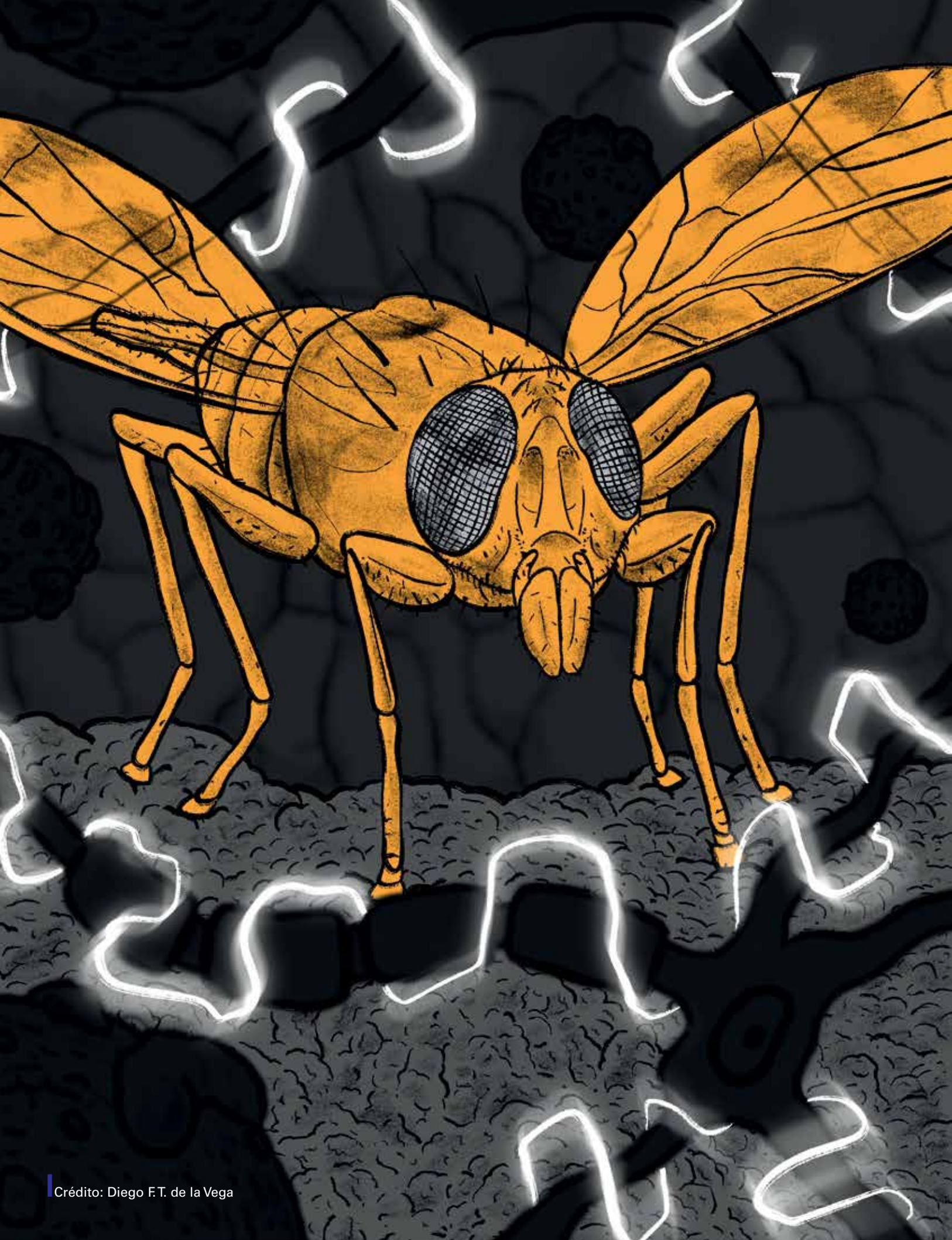
Akgun, S. y C. Greenhow (2022), “Artificial intelligence in education: Addressing ethical challenges in K-12 settings”, *AI and Ethics*, 2:431-440. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s43681-021-00096-7>>, consultado el 9 de abril de 2025.

Fahimirad, M. y S. S. Kotamjani (2018), “A review on application of artificial intelligence in teaching and learning in educational contexts”, *International Journal of Learning and Development*, 8(4):106-118. Disponible en: <<https://doi.org/10.5296/ijld.v8i4.14057>>, consultado el 9 de abril de 2025.

Hazelett, D. J. (2025), “An open letter to graduate students and other procrastinators: it’s time to write”, *Nature Biotechnology*, 43:447-450. Disponible en: <<https://doi.org/10.1038/s41587-025-02584-1>>, consultado el 9 de abril de 2025.

Nguyen, A., H. N. Ngo, Y. Hong, B. Dang y B.-P. T. Nguyen (2023), “Ethical principles for artificial intelligence in education”, *Education and Information Technologies*, 28:4221-4241. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s10639-022-11316-w>>, consultado el 9 de abril de 2025.

Zawacki-Richter, O., V. I. Marín, M. Bond y F. Gouverneur (2019), “Systematic review of research on artificial intelligence applications in higher education – where are the educators?”, *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, 16(1):1-27.





Innovaciones tecnológicas de la UAM

Una de las tareas cruciales de las instituciones de educación superior es apoyar proyectos de investigación para la innovación tecnológica que contribuyan al desarrollo científico, social y económico del país. En este artículo se exponen tres proyectos de vanguardia en la investigación que se desarrolla en diferentes áreas de la Universidad Autónoma Metropolitana, con un potencial enorme de impacto en la salud y la agricultura.

Introducción

A finales del 2024 la Rectoría General de la UAM lanzó una convocatoria, a través de su Dirección de Apoyo a la Investigación, para financiar proyectos de investigación del personal académico por tiempo indeterminado de ingreso reciente, con el fin de apoyarles para impulsar su trayectoria dentro de la propia Universidad. Después de un proceso de revisión por pares, se seleccionaron 53 trabajos de distintas disciplinas propuestos por personal contratado en alguna de las cinco unidades académicas de la UAM.

En este número presentamos avances de tres de los proyectos financiados que tienen como temática común el desarrollo tecnológico. Uno de ellos se refiere al uso de la nanotecnología para fabricar **biopolímeros** comestibles, seguros para el consumo humano, dentro de los que se pueden **encapsular** compuestos bioactivos con diversas aplicaciones en la nutrición y la salud pública. Otro de los textos tiene como objetivo desarrollar trampas eficientes, sustentables y sencillas de usar para controlar específicamente la plaga de la mosca que afecta los cultivos de mango en el sur del país. Las trampas se formulan considerando el comportamiento de estos insectos. Finalmente, un grupo en donde colaboran personas investigadoras de diversas instituciones expone el desarrollo de bioimplantes que pretenden ayudar a la reconexión neuronal después de una lesión en la médula espinal, con resultados muy alentadores.

Así pues, invitamos a las y los lectores a sorprenderse al descubrir la inventiva de parte de nuestro personal académico de reciente ingreso.

Biopolímeros

Materiales naturales biodegradables (como las proteínas y polisacáridos) utilizados para la encapsulación de compuestos nutraceuticos.

Encapsulación

Técnica utilizada para proteger y controlar la liberación de compuestos funcionales en alimentos y suplementos.

Comida inteligente con nanotecnología: pequeñas soluciones para una nutrición más saludable

La nanotecnología se refiere al diseño, fabricación y aplicación de materiales cuyas dimensiones están en la escala nanométrica, típicamente entre 1 y 1 000 nanómetros (nm), es decir, de 10^{-9} a 10^{-6} metros. A esta escala, los materiales adquieren propiedades únicas que no presentan a mayor tamaño. Los nanomateriales pueden estar compuestos tanto de materia inorgánica (como metales y minerales) como orgánica (por ejemplo, proteínas y polisacáridos). Gracias a su pequeño tamaño, estos materiales presentan características funcionales especiales, como mayor reactividad química, propiedades ópticas o mecánicas mejoradas y una superficie específica mucho más alta. Estas propiedades excepcionales permiten que los nanomateriales se utilicen en una gran variedad de aplicaciones, como partículas para el transporte y la liberación controlada de fármacos, sensores, recubrimientos y catalizadores más eficientes, en áreas tan diversas como la medicina, la farmacología, la electrónica y, más recientemente, la industria alimentaria.

Compuesto nutraceutico
Sustancia bioactiva presente en los alimentos (o extraída de ellos) que proporciona beneficios para la salud, más allá de su valor nutricional básico. Puede ayudar a prevenir enfermedades, mejorar funciones fisiológicas o promover el bienestar general.

¿Qué es la nanotecnología alimentaria?

Aunque pudiera pensarse que la nanotecnología aplicada a alimentos es algo reciente, la realidad es que

las nanopartículas naturales han estado presentes en nuestra alimentación desde tiempos ancestrales. Por ejemplo, tanto la leche humana como la de vaca contienen estructuras nanométricas llamadas micelas de caseína, que consisten en ensambles complejos de proteínas, calcio y fósforo. Estas micelas aumentan la solubilidad, digestibilidad y la absorción de los nutrientes esenciales para los lactantes en crecimiento. Asimismo, muchas semillas oleaginosas, como la soya y las nueces, contienen cuerpos oleosos con dimensiones en la escala de los nanómetros. De esta manera, los seres humanos hemos consumido nanopartículas naturales durante miles de años, sin ser plenamente conscientes de ello. Actualmente, la nanotecnología alimentaria busca aprovechar estas propiedades a escala nano para mejorar la apariencia, textura, sabor, estabilidad y valor nutricional de los alimentos (Figura 1). Un ejemplo notable es el uso de nanopartículas para encapsular vitaminas, colorantes, saborizantes, conservadores y **compuestos nutraceuticos**; es decir, moléculas que, al ser consumidas, ofrecen beneficios adicionales a la salud más allá de su aporte nutricional básico. Esta encapsulación confiere protección a los *compuestos sensibles* (por ejemplo, frente a cambios bruscos de temperatura, acidez, exposición a la luz, entre otros) y facilita su incorporación en una amplia va-

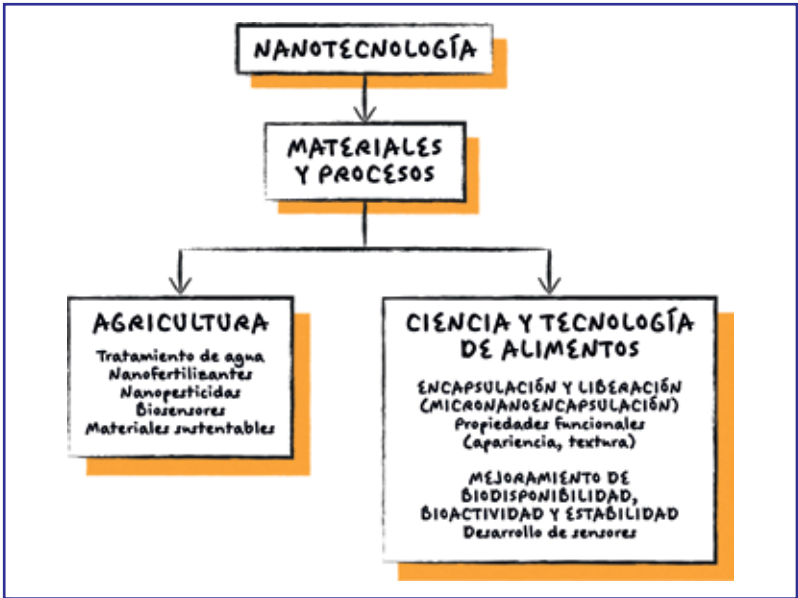


Figura 1. Ejemplos de la aplicación de la nanotecnología para crear materiales y procesos avanzados en las industrias alimentaria y agrícola. Crédito: Diego F. T. de la Vega.

riedad de productos. Para lograr esto, se han desarrollado diversos métodos de producción de nanopartículas basados en procesos físicos, químicos y biológicos.

El caso de la UAM

En la Universidad Autónoma Metropolitana se han desarrollado estrategias innovadoras para la fabricación de nanopartículas a partir de biopolímeros comestibles —como proteínas, carbohidratos y lípidos— que son seguros para el consumo humano. En particular, se han utilizado dos tipos de biopolímeros: las proteínas de la leche y la pectina, un carbohidrato natural extraído de las cáscaras de los cítricos. Las nanopartículas comestibles obtenidas con estos componentes pueden emplearse para encapsular compuestos bioactivos, como la C-ficocianina, una proteína que se extrae de las **cianobacterias**, microorganismos capaces de realizar fotosíntesis, similares a las de las plantas y algas. La C-ficocianina destaca por sus propiedades antioxidantes y antiinflamatorias, lo que la convierte en un agente nutracéutico prometedor. Esta investigación abre nuevas posibilidades para el desarrollo de alimentos funcionales pensados para mejorar la salud de los consumidores.

Impacto potencial de la nanotecnología alimentaria en la salud

De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), las principales causas de muerte en México incluyen enfermedades del corazón, diabetes, cáncer y enfermedades cerebrovasculares. Además de su alto impacto en la mortalidad, estas enfermedades generan una enorme carga económica sobre el sistema de salud pública debido a los recursos requeridos para su atención. Una estrategia clave para contrarrestar esta problemática es mejorar la nutrición de la población. Diversos estudios epidemiológicos han mostrado que una dieta rica en compuestos antioxidantes y antiinflamatorios puede reducir el riesgo de desarrollar enfermedades crónicas como las cardiovasculares, inflamatorias, mentales y ciertos tipos de cáncer.

Uno de los principales desafíos tecnológicos radica en la incorporación eficaz de compuestos bioactivos en los alimentos, de manera que se superen

inconvenientes como inestabilidad y baja solubilidad o **biodisponibilidad**, y su absorción por el organismo sea eficiente. La nanotecnología alimentaria ofrece solución a estos problemas ya que la nanoencapsulación permite proteger los compuestos delicados dentro de estructuras de tamaño nanométrico, mejorando su estabilidad frente a condiciones adversas, y facilitando su liberación en el organismo, lo que optimiza su absorción y efecto. En este contexto, uno de los proyectos que se desarrolla en el Departamento de Procesos y Tecnología de la Unidad Cuajimalpa de la UAM, se centra en el diseño, obtención y caracterización de **nanopartículas comestibles** formadas a partir de proteínas de la leche y pectina, destinadas a encapsular C-ficocianina. Estas nanopartículas no sólo protegen la molécula encapsulada, sino que también permiten modular su liberación de forma más eficiente que los métodos tradicionales de encapsulación, favoreciendo un mejor aprovechamiento de sus beneficios para la salud.

El desarrollo de estas tecnologías representa un avance importante para la ciencia de los alimentos con un impacto potencialmente positivo en la salud pública del país. A medida que se incrementa la demanda de soluciones para mejorar la calidad de vida, disciplinas emergentes como la nanotecnología alimentaria abren nuevas posibilidades para la promoción de la salud mediante alimentos funcionales diseñados estratégicamente.

¿Cómo se hacen las nanopartículas comestibles?

La fabricación de nanopartículas comestibles se puede realizar mediante distintos métodos, los cuales se agrupan en dos enfoques principales: *top-down* y *bottom-up*. El enfoque *top-down* consiste en la fragmentación de materiales a mayor escala hasta alcanzar el tamaño nanométrico, utilizando técnicas físicas o mecánicas como la molienda, la homogeneización a alta presión o el ultrasonido. Por otro lado, el enfoque *bottom-up* implica la formación de nanopartículas a partir del autoensamblaje de átomos o moléculas, promoviendo su crecimiento controlado mediante procesos como la precipitación, **coacervación** o **polimerización**. Cada estrategia presenta ventajas y limitaciones que determinan

Biodisponibilidad

Es la cantidad de un nutriente o compuesto nutracéutico que el cuerpo puede absorber y utilizar.

Nanopartículas comestibles

Estructuras de dimensiones nanométricas diseñadas para transportar y liberar compuestos de manera controlada en el organismo.

Cianobacterias

Microorganismos fotosintéticos ricos en antioxidantes y otros compuestos beneficiosos para la salud.

Coacervación

Proceso de separación de fases en el que se forman gotículas ricas en polímeros (llamadas coacervados) dentro de una solución, utilizadas comúnmente para encapsular compuestos activos y protegerlos o liberarlos de forma controlada.

Polimerización

Proceso químico mediante el cual pequeñas moléculas llamadas monómeros se unen para formar estructuras más grandes y repetitivas conocidas como polímeros.

su aplicación según las propiedades deseadas en el material final.

La fabricación de nanopartículas comestibles comprende diversas etapas, desarrolladas principalmente en el Laboratorio de Superficies de la Unidad Cuajimalpa de la UAM. El proceso inicia con la obtención de la materia prima –proteínas de la leche y pectina– destinada a la formación de las nanopartículas, así como la selección o extracción de los compuestos nutraceuticos, en este caso, la C-ficocianina. Es importante señalar que todos los ingredientes e insumos deben ser de grado alimenticio para garantizar su inocuidad. Posteriormente, se emplean métodos sustentables y no tóxicos para inducir la formación de las nanopartículas, como variaciones controladas de temperatura o de pH. Una vez formadas, las nanopartículas se someten a estudios de caracterización que incluyen la evaluación de su tamaño, morfología, carga superficial, entre otras propiedades fisicoquímicas relevantes. Finalmente, se analiza su estabilidad frente a diferentes condiciones ambientales (temperatura, acidez, fuerza iónica, entre otras) y se determina la eficiencia del sistema en la protección y mejora de la biodisponibilidad de los compuestos encapsulados (Figura 2).

pH (potencial de hidrógeno)
Medida que indica qué tan ácida o básica es una solución, en una escala que va de 0 a 14. Valores bajos (menores a 7) indican acidez, valores altos (mayores a 7) indican alcalinidad, y un pH de 7 representa neutralidad.

Innovación de la investigación

La aplicación de la nanotecnología en la encapsulación de compuestos bioactivos representa un avance importante en la industria alimentaria. A diferencia de los métodos tradicionales, que a menudo emplean materiales sintéticos, las nanopartículas comestibles desarrolladas en la UAM están elaboradas a partir de biopolímeros naturales, lo que las hace más seguras y compatibles para el consumo humano. Además, su producción se basa en metodologías verdes y sostenibles, contribuyendo a la reducción del impacto ambiental. Se espera que el tamaño nanométrico de estas partículas no sólo proteja mejor los compuestos encapsulados, sino que también mejore los perfiles de liberación controlada y favorezca significativamente su absorción y biodisponibilidad en el organismo, potenciando sus efectos beneficiosos para la salud.

Nanotecnología: impacto social y aplicaciones futuras

La nanotecnología tiene el potencial de transformar la forma en que consumimos alimentos y suplementos al ofrecer múltiples beneficios para la salud. Entre sus principales ventajas se encuentra la mejora en el aprovechamiento de nutrientes, lo que contribuiría a reducir las deficiencias nutricionales en la pobla-

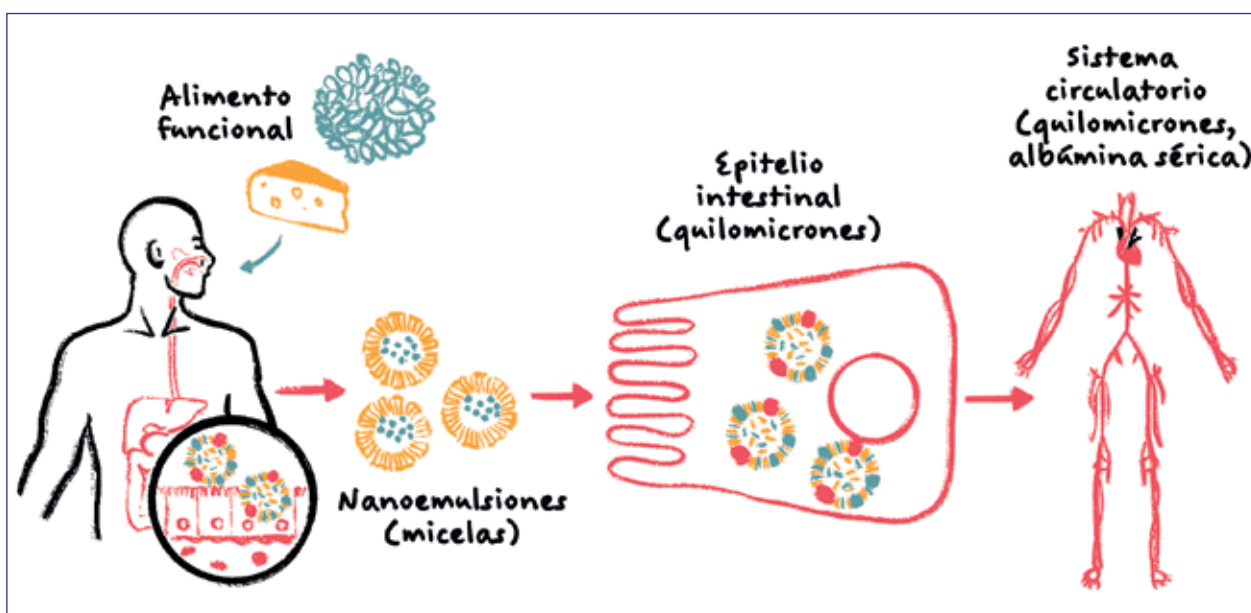


Figura 2. Esquema representativo de la ruta de absorción y transporte de compuestos bioactivos desde un alimento funcional nanoestructurado hasta el sistema circulatorio. Los compuestos bioactivos se muestran desde su liberación en forma de micelas, absorción en el epitelio intestinal (formación de quilomicrones), hasta su transporte en el sistema circulatorio asociados a quilomicrones y albúmina sérica. Crédito: Diego F. T. de la Vega.

ción. Asimismo, permite el desarrollo de alimentos funcionales más efectivos, mediante una mejor protección y una liberación controlada de compuestos nutraceuticos. Todo esto puede lograrse a través de alternativas sustentables, utilizando biopolímeros biodegradables. La incorporación de estos sistemas en productos como yogures, quesos, bebidas, panes y suplementos, entre otros, mejoraría su calidad y favorecería de manera significativa la salud de los consumidores. Además, se prevé que la nanotecnología tenga una presencia cada vez mayor en la industria alimentaria.

El comportamiento de los insectos en la agricultura moderna

Actualmente, la agricultura enfrenta numerosos desafíos, uno de éstos es el manejo y control de plagas, que es un problema de vital importancia para el ser humano en la protección de los alimentos. Tradicionalmente, los agricultores recurren a insecticidas para el control de plagas, lo cual conlleva consecuencias ambientales que también pueden afectar al ser humano.

El estudio del comportamiento de los animales (etología) se ha vuelto una opción amigable con el medio ambiente y que representa una alternativa viable y sustentable para el control de plagas en la agricultura moderna. El comportamiento de los insectos está mediado por tres distintos estímulos: 1) los químicos, como el olor de las plantas, el olor de un insecto al aparearse, el de las abejas en peligro o defensa; 2) los físicos, que incluyen los colores, las sombras, las formas (el color de un plátano, la forma de una flor abierta o de un fruto grande); 3) los mecánicos, que son sonidos o vibraciones generados cuando se alimentan, mastican, o mueven las alas los insectos y generan frecuencias específicas de comunicación. Estos estímulos son usados comúnmente por los insectos para localizar plantas, a sus presas, o en la búsqueda de pareja, e incluso para la comunicación entre ellos. Conocer este tipo de estímulos y la importancia que tienen en la etología de estas especies nos brinda herramientas útiles para entender su comportamiento.

En el ámbito agrícola, el estudio de los insectos en su hábitat natural nos ayuda a identificar comportamientos, patrones y relaciones que son fundamentales para el desarrollo de estrategias de manejo de plagas, por ejemplo, al observar las preferencias alimenticias de los insectos. Con ello, podemos implementar prácticas de cultivo que atraigan insectos controladores naturales de las plagas, como depredadores y parásitos. Con este conocimiento incluso es posible atraer a la plaga a plantas trampa, plantas que no sean de interés económico en el cultivo, pero que sirvan para contener la plaga.

El estudio del comportamiento de los insectos nos permite identificar momentos oportunos vulnerables de su ciclo de vida, lo que es clave para desarrollar medidas de control efectivas con un enfoque de prevención; por ejemplo, si se conoce el momento exacto en que una plaga comienza a reproducirse o alimentarse, se podrían aplicar con anticipación tácticas de control, como el **control biológico** o el **control cultural**, minimizando así el uso de insecticidas y reduciendo el impacto ambiental. Los insectos no actúan de manera aislada, sus comportamientos con otras especies son fundamentales para el equilibrio del ecosistema. Entender estos principios básicos que se fundamentan en la etología son la base para promover mayor biodiversidad de especies, fomentando una diversidad de cultivos que puede ayudar a crear un entorno mucho más sustentable y con mayores interacciones, donde los insectos tengan un mejor equilibrio biológico. Esto no sólo reduce la dependencia de productos químicos, también mejora la salud del suelo y la calidad del agua.

La investigación del comportamiento de los insectos debe resultar en prácticas agrícolas accesibles y aplicables. Es esencial la colaboración entre las personas que realizan la investigación y aquellas dedicadas a la producción, ya que de esto depende el desarrollo de programas de manejo integral de plagas que sean sustentables y que se adapten a las condiciones locales de cada región y cultivo. El futuro del control de plagas en la agricultura luce prometedor con el uso de la etología; a medida que se avance en la investigación y se compartan conocimientos,

Control biológico

Táctica de manejo de plagas que utiliza organismos vivos, como depredadores, parásitos o patógenos, para controlar las poblaciones de plagas.

Control cultural

Tácticas de manejo mediante prácticas agrícolas y manejo del entorno que buscan prevenir o reducir poblaciones de plagas.

es probable que veamos un aumento en la adopción de prácticas agrícolas más sustentables.

¿Qué se hace en México?

Actualmente, en nuestro país se llevan a cabo diversas iniciativas para aplicar la etología en el control de plagas. Se estudian los comportamientos de los insectos, pero no sólo a nivel superficial, como es el caso de insecto-planta, sino en cuatro niveles o más (planta-herbívoro-depredador-polinizador); este tipo de perspectiva nos ayuda a entender las múltiples interacciones biológicas que se dan en cultivos que contienen diferentes especies agrícolas, como son los policultivos.

Además, se evalúan nuevos olores provenientes de plantas, así como el de las plagas potenciales para México. Se desarrollan nuevas trampas diseñadas específicamente para atraer y capturar insectos plagas, utilizando olores sintéticos que imitan sus aromas o señales naturales. Estas trampas ayudan a reducir la población de plagas y permiten un monitoreo más efectivo de la presencia de insectos perjudiciales en el cultivo.

Innovación en el control etológico de plagas con trampas: la mosca de la fruta

Una de las herramientas del **control etológico** de plagas con alto potencial es la de las trampas para la captura y monitoreo de insectos, las cuales son estratégicas en la agricultura. Sin embargo, el interés en la renovación y actualización de estas trampas es es-

caso; ejemplo de ello es la trampa Multilure, utilizada para el control de la mosca de la fruta (*Anastrepha* spp.), la cual no ha sido formalmente actualizada por más de 20 años. Al diseñar las trampas se deben considerar dos factores clave: la alta capacidad para su captura basada en la etología del insecto, así como la funcionalidad y practicidad en la manipulación por los seres humanos.

Actualmente, un grupo de trabajo dirigido por investigadores de la UAM desarrolla tecnologías de innovación en la creación de trampas más eficientes, específicas, sustentables y sencillas de usar; una tecnología que resulte eficiente en el monitoreo, muestreo y control de la plaga de la mosca de la fruta (*Anastrepha ludens*) en cultivos de mango de la zona sur del país (**Figura 3**).

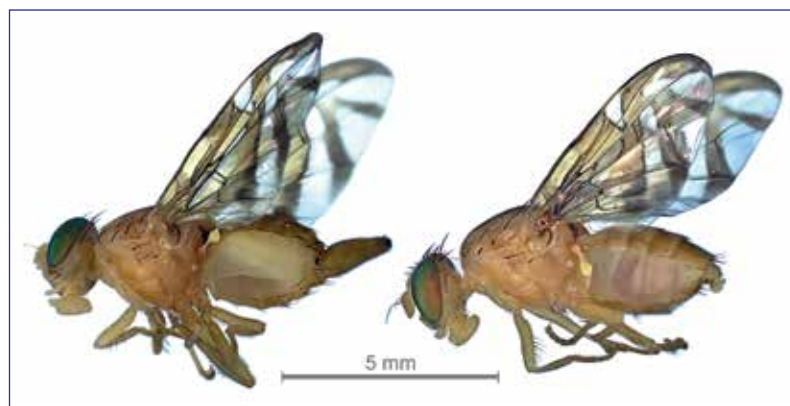
Conclusión

El estudio del comportamiento de los insectos en la agricultura representa una alternativa prometedora y sustentable para el manejo y control de plagas. La etología nos proporciona herramientas para comprender mejor las complejas interacciones entre los insectos y su entorno, lo que puede llevar a estrategias de control más efectivas y respetuosas con el medio ambiente.

Al adoptar un enfoque basado en el comportamiento, la agricultura puede avanzar hacia un futuro más prometedor, donde la producción de alimentos se realice en armonía con la naturaleza. Entender estos conceptos e innovar y potencializar esta táctica

Control etológico

Tácticas de manejo de plagas basadas en el estudio del comportamiento de los insectos para manipularlos y así reducir sus poblaciones o minimizar los daños que causan.



Anastrepha obliqua (Diptera: Tephritidae) hembra y macho, vista lateral. Crédito: Wikipedia.org / Jorge Valdez, Colegio de Postgraduados, Mexico. jvaldez@colpos.mx.

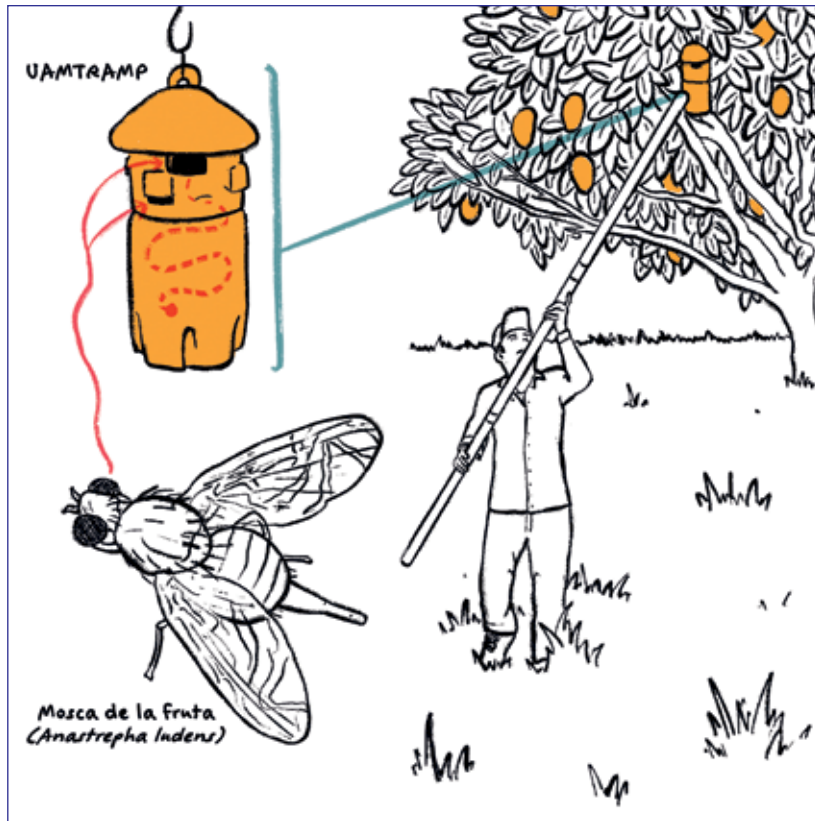


Figura 3. Trampeo de la mosca de la fruta (*Anastrepha ludens*) en cultivos de mango mediante una trampa diseñada por la UAM (UAMTramp).

de control nos dará resultados más favorables para una agricultura moderna.

Recuperación de lesiones en la médula espinal

Una lesión de médula espinal (LME) es un daño físico que afecta al tejido nervioso de la médula espinal, la cual es responsable de transmitir señales entre el cerebro y el resto del cuerpo, para el control de las funciones motoras que generan el movimiento, las funciones sensitivas que detectan los diferentes estímulos, así como las funciones autonómicas, como el control de la respiración y el ritmo cardíaco. Las LME ocurren principalmente debido a eventos traumáticos, como accidentes automovilísticos, caídas, lesiones deportivas o actos de violencia. La LME es una enfermedad discapacitante que constituye una problemática de salud pública mundial, debido a que conduce a la pérdida permanente de funciones motoras, sensoriales y autónomas, desde el sitio de la

lesión hacia la parte inferior del cuerpo, produciendo discapacidad, gastos en salud y dependencia. Las consecuencias afectan la vida de los pacientes y sus familiares.

Actualmente, no se cuenta con tratamientos eficaces para la recuperación completa de los pacientes y esto se debe a la poca capacidad de regeneración natural, así como a eventos secundarios que aumentan el daño original. Si bien se conocen cada vez más a fondo los complejos efectos de las LME, y ha sido ardua la investigación en estrategias para la recuperación de los pacientes que la padecen, la búsqueda de una rehabilitación completa aún es vigente. Las investigaciones en esta línea se siguen nutriendo de los avances tecnológicos en áreas como la imagenología médica, farmacología, ingeniería de tejidos y medicina regenerativa. El uso de biopolímeros para fomentar la reconectividad neuronal, así como de terapias de rehabilitación física para mantener el buen estado de los músculos y articulaciones son es-

trategias experimentales para restablecer la función neurológica después de una LME.

En un grupo de trabajo multidisciplinario y en constante crecimiento, integrado por investigadores de la Universidad Autónoma Metropolitana, el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, el Instituto Mexicano del Seguro Social, la Fundación Camina A. C., el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares y el Centro Nacional de Investigación en Imagenología e Instrumentación Médica, con apoyo del entonces Conahcyt y la Secretaría de Educación, Ciencia, Tecnología e Innovación (SECTEI), se desarrollan implantes que pretenden fomentar la reconectividad neuronal. El biomaterial llamado *poli-pirrol-yodo* que se usa para hacer los implantes es rico en nitrógenos, lo que le da características apropiadas para su interacción con el sistema nervioso. Este biomaterial se fabricó mediante una técnica especial dentro de un tubo de vidrio parecido a un horno sellado con tapas metálicas. En un lado se colocó una

bomba para sacar el aire, un medidor para revisar la presión, y un sistema que actúa como un congelador para atrapar partículas no deseadas. En otro extremo se introdujeron los ingredientes principales: yodo y una sustancia llamada pirrol. Dentro del tubo también hay dos discos metálicos: uno conectado a tierra y otro a una fuente de energía parecida a una señal de radio. Una forma de imaginar este proceso es pensar en pintar una pared usando niebla. Primero, los ingredientes se transforman en vapor, como si se convirtieran en una neblina de pintura. Luego, al aplicar energía, esas partículas se organizan y se van pegando poco a poco a la superficie interna del tubo, formando una capa muy delgada, como si la niebla se fuera asentando y pintando suavemente la pared. Así se forman las películas delgadas de este material especial que se utilizarán durante una cirugía.

Simulamos dos casos de lesión en la médula espinal (que es como una autopista de nervios que va por dentro de la columna) y se aplicaron soluciones

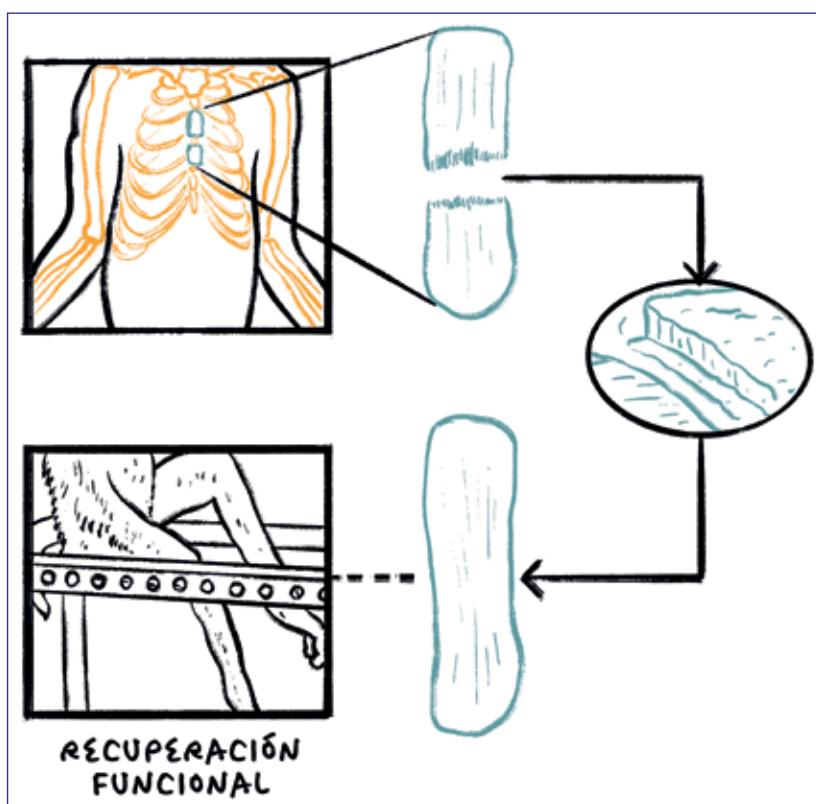


Figura 4. Mediante la implantación de biomateriales en una lesión de médula espinal se ha logrado la recuperación sensitiva y motriz, incluso en sujetos experimentales primates no humanos. Crédito: Diego F. T. de la Vega.

en ambos casos. Antes de cada operación, los sujetos experimentales (monos *Macaca mulatta* y ratas) fueron anestesiados profundamente para asegurarse de que no sintieran dolor. Se hizo un corte en la piel de la espalda y se separaron cuidadosamente los músculos hasta exponer la parte ósea de la columna. Se quitó una pequeña parte del hueso para dejar visible la médula espinal. En el primer caso, simulamos una lesión por sección completa, cortando completamente la médula con unas tijeras muy finas, revisando que no quedara ninguna conexión nerviosa, e implantamos el biomaterial en forma de pastilla o andamio (**Figura 4**). En el segundo caso, se generó una lesión dejando caer un pequeño peso metálico sobre la médula desde una altura corta, para simular una herida por impacto; en ese lugar se inyectó el biomaterial en una suspensión.

Evaluamos la recuperación del movimiento en las patas traseras de los sujetos usando criterios específicos para su especie. En todos los casos, los sujetos que recibieron el implante del biomaterial se recuperaron mejor que los que no recibieron ningún implante, incluso cuando el implante se colocó posteriormente a la lesión y no de manera inmediata después de ella. Además, cuando el implante se combinó con ejercicios de rehabilitación física, como usar una caminadora o nadar, la mejora fue aún mayor. También se notó que el tejido creció a través del área donde se colocó el implante, lo que ayudó a proteger la médula. Este material parece reducir los efectos negativos que ocurren después del daño, como la inflamación. Además, se ha visto que la presencia del implante activa ciertos genes relacionados con la reparación del tejido, el crecimiento y desarrollo de nuevas células, y la comunicación entre neuronas.

Nuestros resultados hasta el momento han sido alentadores. El implante del biomaterial ha muestra-

do efectos positivos en la recuperación del movimiento y la sensibilidad en sujetos con LME, ya sea por un corte o por un golpe, y en distintas etapas del daño, tanto inmediatamente como hasta cuatro semanas después de la lesión. De acuerdo con ello, pensamos que este material puede ser una buena opción para ayudar a mejorar la recuperación de los pacientes. Además, cuando se combina el implante con ejercicios de rehabilitación física, los beneficios son aún mayores.

Se continúa trabajando para generar estrategias terapéuticas en pos de mejorar los efectos del biomaterial en la salud de sujetos con LME.

La sección "Comida inteligente con nanotecnología: pequeñas soluciones para una nutrición más saludable" fue escrita por la doctora Izlia Jazheel Arroyo Maya; el apartado "El comportamiento de los insectos en la agricultura moderna" es una aportación del doctor Salvador Hernández Moreno, y "Recuperación de lesiones en la médula espinal" es un texto del doctor Juan Carlos Axayácatl Morales Guadarrama, ella y ellos adscritos a la Universidad Autónoma Metropolitana.

Izlia Jazheel Arroyo Maya

UAM Cuajimalpa.

larroyo@cua.uam.mx

Salvador Hernández Moreno

UAM Xochimilco.

shernandezm@correo.xoc.uam.mx

Juan Carlos Axayácatl Morales Guadarrama

UAM Iztapalapa.

Axayacatl.morales@xanum.uam.mx

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



La Academia Mexicana de Ciencias reinicia el programa "Un día en la ciencia" en Ozumba de Alzate

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) celebró el reinicio del programa "Un día en la ciencia", antes conocido como "Domingos en la ciencia", con una ceremonia en el atrio de la Parroquia de la Inmaculada Concepción en Ozumba de Alzate, Estado de México, el pasado jueves 27 de marzo.

El doctor José Antonio Seade Kuri, presidente de la AMC, enfatizó la importancia de la ciencia y la tecnología para el desarrollo social de México. Destacó que la Academia siempre "ha tenido una fuerte convicción para acercar la ciencia a la sociedad, en particular a los más jóvenes" y mencionó que este programa es una herramienta fundamental para despertar vocaciones científicas.

El doctor Alejandro de las Peñas Nava, director del programa "Un día en la ciencia", destacó el impacto de "Domingos en la ciencia", programa que inició sus actividades en diciembre de 1982 dentro del Museo Tecnológico de la Comisión Federal de Electricidad en la Ciudad de México y



Autoridades locales, académicos y responsables del programa en diversas sedes del país se dieron cita al reinicio del programa "Un día en la ciencia". Fotografía: Eduardo González / AMC.



El doctor Antonio Lazcano dictó su conferencia "Darwin y el origen de las especies". Fotografía: Eduardo González / AMC.

que contabiliza a lo largo de su historia 11 000 conferencias en 37 sedes distribuidas en 17 estados del país.

La ceremonia culminó con la entrega de un reconocimiento al doctor Raymundo Cea Olivares, coordinador del programa de 2011 a 2022, por su destacada labor en la promoción de la ciencia en la sociedad.

La conferencia inaugural, titulada "Darwin y el origen de las especies", fue impartida por el doctor Antonio Lazcano Araujo, investigador de la Facultad de Ciencias de la UNAM y miembro de El Colegio Nacional, al interior de la parroquia del municipio.

Medalla de bronce para México en la 59ª Olimpiada Internacional de Química Mendeleev

La Olimpiada Mendeleev, como se la conoce habitualmente, es el proyecto insignia de la Universidad Estatal Lomonósov de Moscú y de la Fundación Andrey Melnichenko, destinada al desarrollo de jóvenes talentos.

Es la primera vez que México es invitado a participar en la Olimpiada Internacional de Química Mendeleev (IMChO), la cual, además, en su 59ª edición se celebró por primera vez en una sede latinoamericana, en la ciudad de Belo Horizonte, Brasil, del 5 al 13 de mayo de 2025. En esta edición participaron 192 estudiantes de 39 países.

Las pruebas constan de tres exámenes: dos teóricos y uno experimental. Las tareas del primer examen teórico tienen una dificultad similar a la de los planes de estudio pre-universitarios con un programa de química avanzada, mientras que las del segundo examen son de un nivel superior. El examen ex-



Delegación mexicana en la 59ª Olimpiada Internacional de Química Mendeleev. Fotografía: IMChO.

perimental, con duración de cinco horas, requiere habilidades de laboratorio que incluyen la realización de análisis químicos y síntesis siguiendo un procedimiento indicado. A diferencia de la Olimpiada Internacional de Química, en la Olimpiada de Mendeleev no hay un programa de estudios ni un conjunto de problemas preparatorios.

En esta primera participación de México en la Olimpiada Mendeleev, Adrián Pacheco Toledo, del estado de Morelos, obtuvo una medalla de bronce.

Además de Adrián Pacheco, la delegación mexicana estuvo conformada por Jaime Lafarga Castañeda (Sinaloa), David Ernesto Ceja Aguirre (Michoacán) y César Ronaldo Tamayo Hinojosa (Veracruz), quienes fueron seleccionados en la Olimpiada Nacional de Química (ONQ) de 2025, celebrada del 19 al 23 de febrero de 2025 en la Ciudad de Querétaro. Los doctores Tomás Rocha Rinza y Héctor Eduardo Arellano Franco acompañaron a la delegación mexicana.

Homenaje a la trayectoria del doctor Adolfo Guzmán Arenas

El pasado 17 de junio, el Centro de Investigación en Computación (CIC) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) llevó a cabo un homenaje en honor a Adolfo Guzmán Arenas, director fundador del CIC, por ser un referente de la computación en nuestro país.

En el homenaje participaron el doctor Juan Humberto Sossa Azuela, director del CIC; el doctor Marco Antonio Ramírez Salinas, uno de los alumnos más destacados del doctor Guzmán, quien también fue director del CIC, entre otros investigadores



El doctor Guzmán Arenas ha desarrollado aplicaciones de técnicas computacionales a la resolución de problemas en diversas áreas, ha contribuido a la formación de personal especializado y fundado instituciones para el desarrollo de las ciencias computacionales en nuestro país. Foto: CIC-IPN.

que resaltaron la importancia de la labor del doctor Guzmán a nivel nacional e internacional.

Adolfo Guzmán es ingeniero en comunicaciones y electrónica de la Escuela Superior de Ingeniería y Mecánica y Eléctrica del IPN. Obtuvo su maestría y su doctorado en ciencias de la computación en el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT, por sus siglas en inglés).

En 1994 recibió el Premio Nacional de Informática, que otorga la Academia Mexicana de Informática, y dos años después el Premio Nacional de Ciencias y Artes. En 1997 le fue otorgada la Presea "Lázaro Cárdenas".

En 1996 fundó el Centro de Investigación en Computación del IPN y lo dirigió hasta el año 2002. Es miembro, entre otras organizaciones, de la Academia Mexicana de Ciencias, de la Academia de Ingeniería de México, de la Academia de Ciencias de Nueva York y del comité editorial de la revista *Ciencia*.

CITA

(Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia)

La AMC y el Centro de Ciencias de la Complejidad (C3) de la UNAM coordinan CITA (Ciencia, Innovación, Tecnología y Academia), espacio mensual en el que se reúnen miembros de distintas comunidades de la ciencia, la tecnología, la innovación, la comunicación de la ciencia y el público no especializado para intercambiar perspectivas sobre temas científicos y tecnológicos relevantes y coyunturales.

Los encuentros del programa de CITA son coordinados por Julia Tagüeña Parga, Coordinadora de Comunicación del C3, investigadora emérita del Instituto de Energías Renovables de la UNAM y miembro de la AMC. El formato es presencial y también se transmite por los canales de YouTube de la AMC y del C3.

Las conferencias más recientes son:

- **26 de noviembre de 2024**

"La salud desde un enfoque complejo"

Ana Leonor Rivera

Instituto de Ciencias Nucleares y Centro de Ciencias de la Complejidad, UNAM

<https://www.youtube.com/live/pDMeUwBZ4k8>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron María Ester Brandan del Instituto de Física de la UNAM; Rubén Fossion del Instituto de Ciencias Nucleares y el C3, UNAM, así como Osbaldo Resendis de la Red de Apoyo a la Investigación, del C3-UNAM y del Inmegen; con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.

- **25 de marzo de 2025**

"Sabiduría de los ecosistemas"

John Giordanengo

Economic Restoration Service

<https://www.youtube.com/live/uKn7wSeCM3c>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Andrea Sáenz-Arroyo, de Ecosur y el C3, UNAM; Loreta Castro, de Taller Capital, y Alejandro Frank, del ICN y C3, UNAM, y El Colegio Nacional; con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.

- **29 de abril de 2025**

"Los dilemas demográficos que enfrenta el mundo"

Silvia E. Giorguli Saucedo

El Colegio de México y El Colegio Nacional

<https://www.youtube.com/live/Orsnchwk8fl>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Alanna Armitage, del UNFPA de México; Francisco Alba, de El Colegio de México, y José Miguel Guzmán, de NoBrainerData; con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.



• 27 de mayo de 2025

"Los glaciares mexicanos en el Año Internacional de la Conservación de los Glaciares"

Hugo Delgado Granados

Instituto de Geofísica, UNAM

<https://www.youtube.com/live/Vp9UVrTva-I>

Al término de la conferencia, se invitó a un panel de especialistas para comentar sobre el tema. Participaron Miguel Rubio Godoy, del Instituto de Ecología, A. C.; Lorenzo Vázquez Selem, del Instituto de Geografía de la UNAM, y Anel



Pérez, del Centro de Enseñanza para Extranjeros de la UNAM; con Julia Tagüeña, coordinadora de CITA, como moderadora.

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

Continúan las pláticas que, a través de las redes sociales de la revista *Ciencia*, dictan diversos autores que han contribuido en diferentes números de la misma. Las charlas más recientes han sido:

• 25 de marzo de 2025

"El uso de la inteligencia artificial en la programación fetal"

Omar Piña Ramírez

Instituto Nacional de Perinatología

https://www.youtube.com/live/m_HJZlgrBVM

• 1 de abril de 2025

"Problemas y riesgos de la inteligencia artificial, y legislación para atenderlos"

Adolfo Guzmán Arenas

Centro de Investigación en Computación, IPN

<https://www.youtube.com/live/qqiFal8JC0Y>

• 8 de abril de 2025

"Un viaje fantástico: el papel de la visión computacional para el diagnóstico médico"

Gilberto Ochoa Ruiz

Tecnológico de Monterrey, campus Guadalajara

https://www.youtube.com/live/udF4wlJ2_Ao

• 22 de abril de 2025

"Detección inteligente de caídas para el cuidado de los adultos mayores"

Elizabeth López Lozada

Centro de Investigación en Computación, IPN

<https://www.youtube.com/live/mZEKUKrL4mY>

• 6 de mayo de 2025

"Monitoreo de fenómenos sociales y ambientales mediante observaciones de la superficie terrestre"

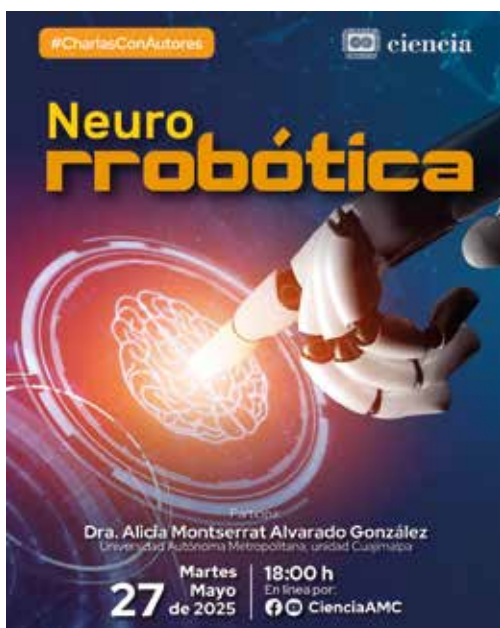
Joaquín Salas

Instituto Politécnico Nacional

<https://www.youtube.com/live/aUzd7B7G4aE>

- **14 de mayo de 2025**
“El cómputo afectivo como experiencia artística”
Anni Garza Lau
Centro Nacional de las Artes
<https://www.youtube.com/live/mw0SqA89jka>

- **27 de mayo de 2025**
“Neurorrobótica”
Alicia Montserrat Alvarado González
Universidad Autónoma Metropolitana, Cuajimalpa
<https://www.youtube.com/live/BVkf-IFsUyk>



- **29 de mayo de 2025**
“Ambientes inteligentes para apoyar el aprendizaje”
Ramón Zatarain Cabada
Instituto Tecnológico de Culiacán
<https://www.youtube.com/live/PJER-OTG0do>

- **3 de junio de 2025**
“Robots e inteligencia artificial”
Ángel García Moreno
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial
Jesús Savage Carmona
Facultad de Ingeniería, UNAM
https://www.youtube.com/live/_fRFSUjTr0I



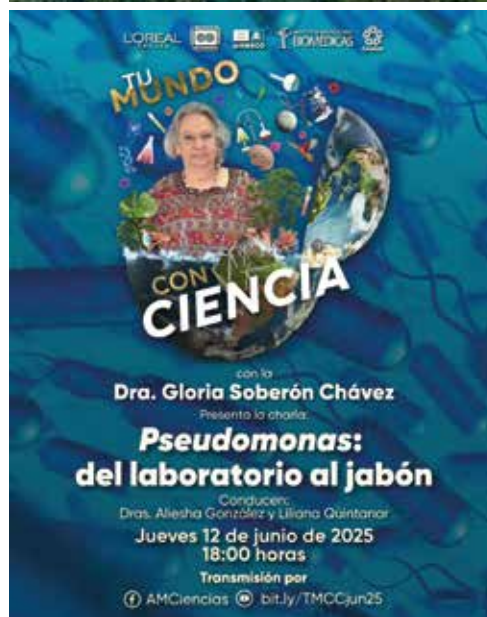
- **10 de junio de 2025**
“Deepfakes, investigación y arte: la IA y los procesos computacionales en la investigación en la UAM”
Eric Alfredo Rincón García
UAM, Iztapalapa
Hugo Solís García
UAM, Lerma
<https://www.youtube.com/live/USrAtXAPQeU>

Webinar “Tu mundo con ciencia”

Continúa el ciclo de conferencias “Tu mundo con ciencia”, impartido (en su mayoría) 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 son transmitidas por los canales de las redes sociales de la AMC. Las conferencias están dirigidas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar vocaciones científicas. En el mes de agosto de 2024 inició su cuarta temporada. Las conferencias más recientes son:

- 13 de marzo de 2025**
 “Los detergentes como contaminantes emergentes: ¿siendo limpios ensuciamos?”
 Karla Ximena Vargas Berrones
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí
<https://www.youtube.com/live/d9JVJ7k1qC0>
- 10 de abril de 2025**
 “Itinerario de una experiencia interdisciplinaria”
 Marlen Hernández Ortiz
 Universidad Autónoma de Zacatecas
https://www.youtube.com/live/VlwmX4wc_2g
- 8 de mayo de 2025**
 “Hidrógeno, influencia de vida”
 Rosa de Guadalupe González Huerta
 ESIQIE, IPN
<https://www.youtube.com/live/QTWI-fvg7Es>
- 12 de junio de 2025**
 “Pseudomonas: del laboratorio al jabón”
 Gloria Soberón Chávez
 Instituto de Investigaciones Biomédicas, UNAM
<https://www.youtube.com/live/Atlj1D0Xf3A>



En nuestro próximo número
de octubre-diciembre de 2025

NOVEDADES CIENTÍFICAS



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

