

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

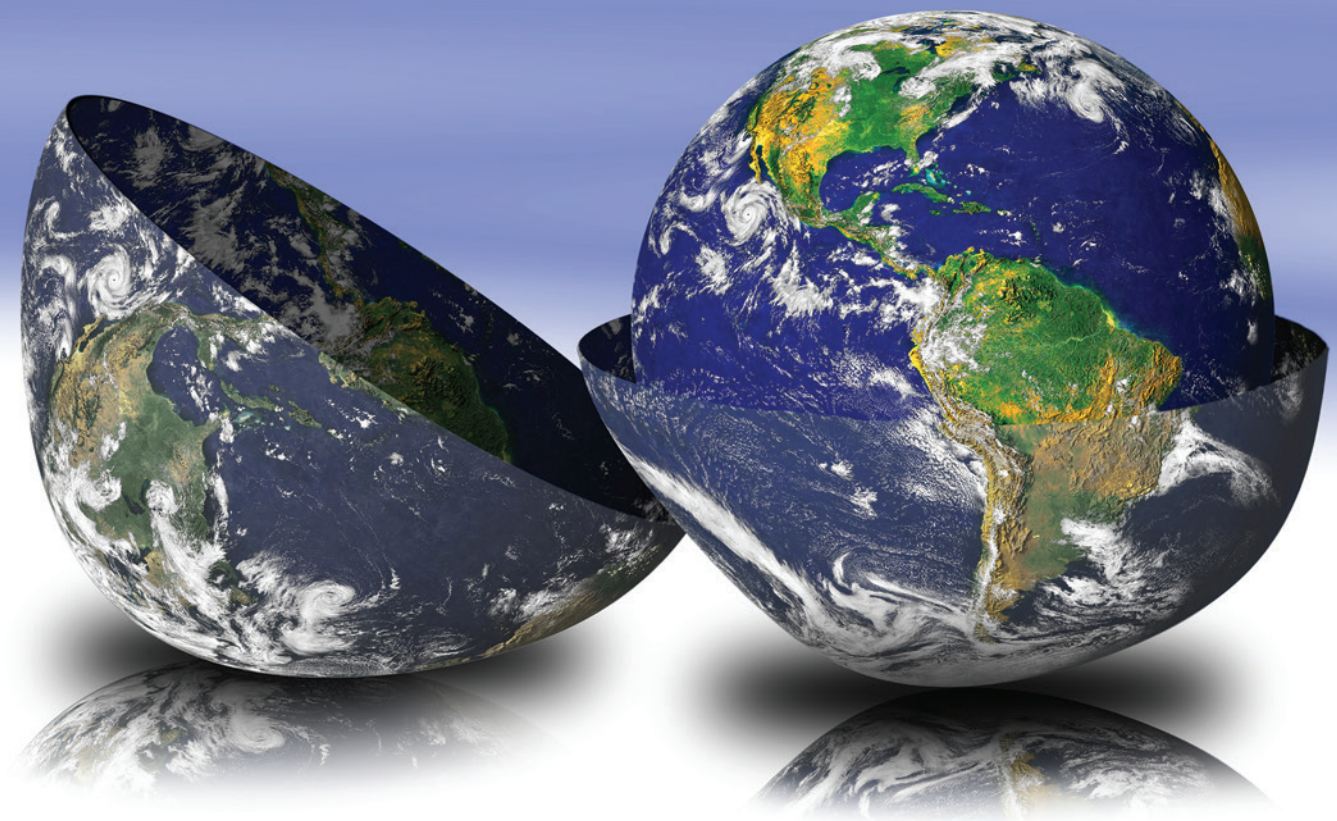
Novedades científicas

Biogeoquímica, la historia cambiante de un planeta vivo

La importancia del tratamiento del mal de Parkinson

El extraño caso de las proteínas multifuncionales

Usos biotecnológicos del pez león



Variantes del SARS-CoV-2



CONSEJO DIRECTIVO
julio 2020 - julio 2023

Presidenta

Estela Susana Lizano Soberón

Vicepresidente

José Antonio Seade Kuri

Tesorero

Dante Jaime Morán Zenteno

Secretarios

María del Jesús Rosales Hoz

Pedro Salazar Ugarte

Presidentes de las Secciones Regionales de la AMC

Sección Centro-Occidente: María Patricia Arias Rozas

Sección Centro-Sur: María del Carmen Cisneros Gudiño

Sección Noreste: Oliverio Santiago Rodríguez Fernández

Sección Noroeste: Alfredo Ortega Rubio

Sección Sur-Sureste: Soledad María Teresa Hernández Sotomayor

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

enero-marzo 2022 volumen 73 número 1

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

Novedades científicas

El diablito, la sirena y otros transgénicos	4
<i>Sofía Navarrete González, Yuvia Contreras Rocha y Angélica López Rodríguez</i>	
Vínculo de la especie humana con la naturaleza	12
<i>Lorena Paola Herrera, Mara de Rito y Jonathan von Below</i>	
El extraño caso de las proteínas multifuncionales	18
<i>Abraham Omar Rivera Ramírez, Blanca Inés García Gómez y Édgar Dantán González</i>	
Diseño de biocombustibles sólidos para un desarrollo sustentable	26
<i>Noemí Hernández Neri, Claudia Gutiérrez Antonio y Juan Fernando García Trejo</i>	
Galileo y Kepler (parte I)	34
<i>José Luis Álvarez García</i>	
Usos biotecnológicos del pez león	42
<i>Mayra Pamela Becerra Amezcua y Arisaf C. Hernández Sámano</i>	
Biogeoquímica, la historia cambiante de un planeta vivo	50
<i>María de la Luz Avendaño Yáñez y Yareni Perroni Ventura</i>	
La importancia del tratamiento de la enfermedad de Parkinson	56
<i>Israel González Saavedra y Laura Virginia Adalid Peralta</i>	
Inductores de defensa para activar el sistema inmune de las plantas	64
<i>Tomás Rivas García, Luis Guillermo Hernández Montiel y Jorge Alberto Alejandro Rosas</i>	
Alternativas para el aprovechamiento integral de residuos orgánicos	70
<i>Valeria Caltzontzin Rabell, Claudia Gutiérrez Antonio y Juan Fernando García Trejo</i>	

De actualidad

Las variantes del SARS-CoV-2: una preocupación más por la pandemia de COVID-19	79
<i>Nora A. Fierro</i>	

Desde las redes

Mentir bajo el cubrebocas	89
El primer milpiés con mil pies	90
La disyuntiva entre la presencialidad y la virtualidad	91
<i>José Eduardo González Reyes</i>	

Noticias de la AMC

92



Portada: DepositPhotos.



Separador: Ana Viniegra.

ciencia, volumen 73, número 1, correspondiente a enero-marzo de 2022, editado y distribuido por la Academia Mexicana de Ciencias, A. C. El contenido de los artículos es responsabilidad exclusiva de los 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. Certificado de Reserva de Derechos al uso exclusivo del título 04-2001-072510183000-102 expedido el 25 de julio de 2001 por el Instituto Nacional del Derecho de Autor de la Secretaría de Educación Pública. Certificado de Licitud de Título y Contenido 17371 expedido por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. ISSN 1405-6550. Editor responsable: Francisco Salvador Mora Gallegos. Formación: Intidrinero, S.A. de C.V., tel.: 55-5575 5846. Correspondencia: Academia Mexicana de Ciencias, A. C., atención: Revista Ciencia, 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 4903, fax: 55-5849 5108, rciencia@unam.mx, <http://www.amc.mx>.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
enero-marzo 2022 volumen 73 número 1

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Alonso Fernández Guasti

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero

Raúl Ávila

Ana Cecilia Noguez

Raymundo Cea

Deborah Dultzin

Ronald Ferrera

Gerardo Gamba

Adolfo Guzmán

Juan Pedro Laclette San Román

Miguel Ángel Pérez de la Mora

Carlos Prieto de Castro

Sergio Sánchez Esquivel

Alicia Ziccardi

Editora

Rosanela Álvarez

Corrección de estilo y enlace con autores

Paula Buzo

Social Media

José Eduardo González Reyes

Diseño y formación

Intidrinero, S.A. de C.V.

Ilustradora

Ana Viniegra, pp. 5, 13, 19, 35, 43, 65, 71, 78

Depositphotos: pp. 8, 22, 24, 25, 27, 31, 32, 33, 45, 47, 48, 57, 62, 73, 76, 80, 82, 83, 85, 87

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.: 5849 4903, fax: 5849 5108

www.revistaciencia.amc.edu.mx

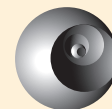


@CienciaAMC



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

Este número de la revista *Ciencia* ha sido posible gracias al patrocinio del Instituto de Investigaciones Jurídicas y de la Coordinación de la Investigación Científica de la UNAM.



Coordinación de la
Investigación Científica UNAM

Desde el Comité Editorial

Estimados lectores: empieza el 2022 y aprovecho para desearles un excelente año. Ojalá y que pronto termine la pandemia.

El primer artículo de esta serie de Novedades Científicas nos habla de un tema de mucha actualidad: ¿qué son los transgénicos?, ¿existen plantas y animales transgénicos?, ¿cuáles son sus riesgos y beneficios?, ¿pueden afectar la fisiología humana y los ecosistemas? El artículo titulado “El diablito, la sirena y otros transgénicos” nos responde estas preguntas.

Desafortunadamente los humanos hemos experimentado una desconexión con nuestro entorno natural y en consecuencia han aumentado los problemas ecológicos. Los autores del artículo titulado “Vínculo de la especie humana con la naturaleza” identifican algunas claves importantes para fortalecer nuestro nexo con la naturaleza y comprender una parte de nuestras acciones cotidianas para cuidar el ambiente.

¿Tienen las proteínas una sola función? Un artículo nos muestra que las proteínas, llamadas *moonlighting*, tienen múltiples funciones que nos ayudan a entender los intrincados acertijos celulares. El artículo titulado: “El extraño caso de las proteínas multifuncionales” explica los posibles orígenes de estas proteínas, haciendo una divertida analogía con la novela de Stevenson sobre el Dr. Jekyll y Mr. Hyde.

México tiene un gran potencial para explorar alternativas de obtención de biocombustibles sólidos a partir de biomasa. Además, la mitigación del problema del cambio climático es posible si se considera a la bioenergía en el mediano y largo plazo. En el excelente artículo “Diseño de biocombustibles sólidos para un desarrollo sustentable” se revisa el uso de herramientas de simulación de procesos para la producción de biocombustibles.

¿Quiénes fueron Galileo y Kepler?, ¿cuáles fueron sus contribuciones?, ¿se conocieron? Dos personajes, participantes de la revolución científica, con personalidades disímboles y contrastantes que protagonizaron algunos de los episodios más relevantes del desarrollo de la astronomía. “Galileo y Kepler” es la primera parte de la historia de dos mentes brillantes de principios del siglo XVII.

El pez león, además de hermoso, es una especie con un alto potencial de usos biotecnológicos debido a las diversas propiedades de las sustancias extraídas de su veneno. La investigación sobre nuevas moléculas producidas por este pez es necesaria para desarrollar nuevos y mejores tratamientos contra el cáncer, estudiar enfermedades neurológicas y proponer aplicaciones en la industria.

¿Qué es la biogeoquímica? La historia del planeta Tierra es larga e interesante. En su origen había pocos elementos. La aparición de la vida impulsó la coevolución de la geósfera y la biósfera. La fotosíntesis oxigéni-

ca cambió las condiciones de la atmósfera y la actividad humana acelera algunos cambios. Desde la aparición de la vida, los elementos esenciales se transportan entre los seres vivos y el aire, el suelo o el agua de la corteza oceánica y continental y se van transformando a diferentes velocidades. Todo esto y más puede descubrirse en el artículo “Biogeoquímica, la historia cambiante de un planeta vivo”.

En la enfermedad de Parkinson mueren ciertas neuronas en el cerebro que producen dopamina. El tratamiento de esta enfermedad consiste en administrar compuestos que compensan la falta de este neurotransmisor. De manera interesante los autores del trabajo “La importancia del tratamiento de la enfermedad de Parkinson” han descubierto que este tratamiento también tiene efectos en el sistema inmune, por lo que es muy importante que sigan las indicaciones médicas para mejorar su calidad de vida.

¿Las plantas tienen sistema inmune? Las plantas cuentan con mecanismos de defensa específicos para contrarrestar el desarrollo de enfermedades. Los inductores de defensa son moléculas reconocidas por la planta que activan los mecanismos de defensa. Estas moléculas podrían emplearse para aumentar la disponibilidad de alimentos y el control de fitopatógenos sin requerir la aplicación de plaguicidas químicos. Descubre todo esto en el artículo: “Inductores de defensa para activar el sistema inmune de las plantas”.

El artículo “Alternativas para el aprovechamiento integral de residuos orgánicos” nos pregunta: ¿qué pasa con toda la comida que no nos comemos? Anualmente se desperdicia un tercio del total de los alimentos producidos en el mundo para el consumo humano; esa cifra representa 1 300 millones de toneladas, cantidad equivalente a lo que consumen 3 700 millones de personas durante un año. Estos residuos son un problema de contaminación y podrían aprovecharse mediante procesos de conversión con el uso de biorrefinerías.

El artículo de actualidad nos habla de las variantes del SARS-CoV-2. El copiado continuo del genoma del virus, que ocurre al pasar de una célula a otra y de una persona a otra, promueve la producción de mutaciones. Éstas pueden dar origen a variantes que, en algunos casos, le ayudarán a adherirse a las células con mayor fuerza, o bien le permitirán esconderse de la respuesta inmunitaria. Por ejemplo, los resultados preliminares sugieren que el riesgo de reinfectarse por la variante Ómicron de SARS-CoV-2 es mayor que con otras variantes y desconocemos la efectividad de las vacunas disponibles frente a esta variante.

ALONSO FERNÁNDEZ GUASTI
Director

Sofía Navarrete González, Yuvia Contreras Rocha y Angélica López Rodríguez

El diablito, la sirena y otros transgénicos

Aunque el desarrollo socioeconómico se ha visto favorecido por las modificaciones genéticas inducidas al propiciar la cruce de algunos tipos de plantas o animales con determinadas características, el uso y consumo de productos transgénicos sigue siendo un tema controversial, pues a pesar de su creciente popularidad todavía existen dudas porque no se conocen sus riesgos y beneficios a largo plazo.

Quimera

En la mitología griega, era un monstruo con cabeza de león, cuerpo de cabra y cola de serpiente, que además escupía fuego. En la ciencia, así se define a un organismo o estructura que tiene más de un tipo de genes.

Existen mitos y leyendas en todo el mundo que frecuentemente hablan de seres extraordinarios, híbridos o **quimeras** con cuerpo de humano y cabeza de algún otro animal, o viceversa, que además poseen características o habilidades que una persona común y corriente no tiene. Por ejemplo, ¿quién no ha oído hablar del niño travieso con alas llamado Cupido, que al disparar una flecha hace que te enamores, o bien del minotauro —mitad toro, mitad humano— que nació a partir de una relación entre la esposa de un rey y un toro? Y para ponernos patriotas, ¿qué tal si le echamos un vistazo a nuestra lotería mexicana? Ahí tenemos en la carta número 2 a “El diablito”, un hombre rojo con cuernos, cola, una pata de cabra y otra de gallo; también en el número 6 encontramos a “La sirena”, mitad mujer y mitad pescado (véase la Figura 1).

Cruza de especies

La unión de las células sexuales del progenitor femenino con las del progenitor masculino para obtener una descendencia con características de ambos.

Pero, si procuramos la objetividad, deberíamos pensar que estas criaturas fantásticas solamente podrían haberse creado mediante la **cruza de especies** u otra manera de inducir la combinación del material genético de organismos diferentes. A pesar de que estos seres parecen sacados de la imaginación, hoy en día la ciencia sigue buscando cómo modificar genéticamente a diversas especies de plantas, animales y microorganismos, y posiblemente —en un ámbito más controversial— en el futuro se considerará el mejoramiento de la especie humana.

La práctica de diversas metodologías para el mejoramiento de plantas y animales proviene de tiempos ancestrales, desde que las poblaciones humanas seleccionaban características específicas —como el tamaño, la forma, el color, la resistencia a temperaturas extremas o a las enfermedades— y luego cruzaban a las especies para favorecer la propagación permanente de las propiedades deseadas según las necesidades de uso o consumo. Hoy la producción de transgénicos es una herramienta

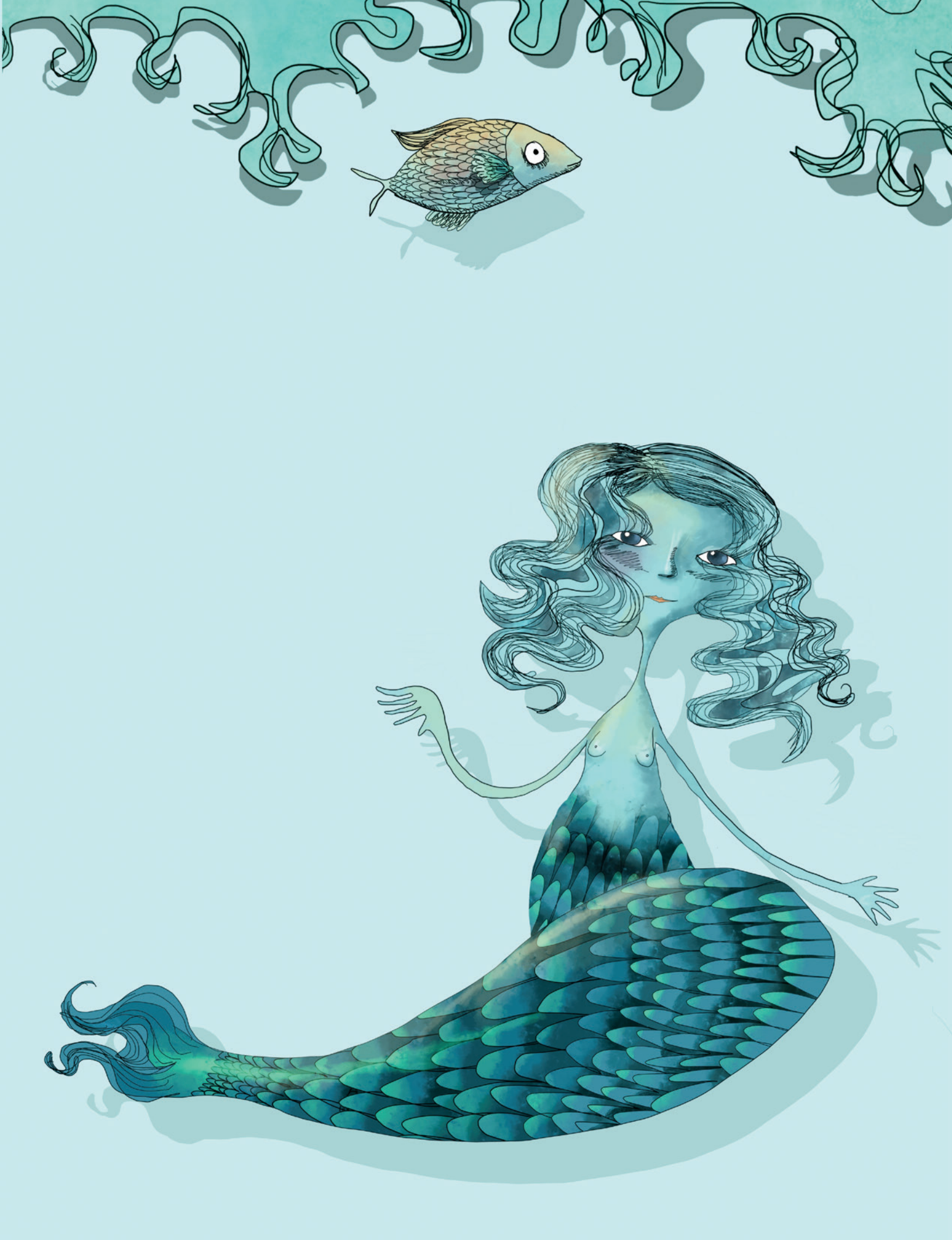




Figura 1. El diablito y la sirena, quimeras clásicas de la lotería mexicana.

biotecnológica para modificar genéticamente a los organismos, al agregar, cambiar o eliminar intencionalmente una o más secuencias génicas, para que luego éstos sean capaces de expresar y transferir de manera estable el **transgén** a su descendencia.

Transgén

La secuencia de ADN modificado.

■ ■ ■ **Plantas y cultivos transgénicos**

Recientemente, en el Centro Internacional de la Papa (CIP) en Lima, Perú, se analizó el **genoma** de diferentes especies de camote (también llamado boniato o batata) cultivadas en América, Europa, Indonesia, China y África (véase la Figura 2). Re-

Genoma

El material genético completo de un ser vivo.

sultó que, de 304 plantas estudiadas, 291 tienen al menos una inserción de genes que no se encuentran en los camotes silvestres. En especial, las inserciones encontradas coinciden con secuencias génicas provenientes de dos bacterias del suelo: *Agrobacterium tumefaciens* y *A. rizogenes*. Curiosamente, debido a su capacidad de insertar nuevas secuencias en el genoma de las plantas que invaden, estas bacterias se utilizan con frecuencia en los laboratorios de biotecnología como vectores biológicos para generar plantas transgénicas en condiciones controladas. Así, de acuerdo con las evidencias, mediante la evolución de las especies los organismos transgénicos pudie-



Figura 2. El análisis del genoma de camotes provenientes de diferentes regiones (en azul) evidenció que se trata de una planta genéticamente modificada en forma natural.

ron también desarrollarse de manera natural y, por consecuencia, alguna vez hemos usado o consumido productos transgénicos, ya sea generados en un laboratorio o en la naturaleza; entonces, esperamos que conforme se analice el genoma de más especies se acumulen más evidencias acerca de estos eventos.

Los cultivos que más se han modificado genéticamente son el trigo, el arroz, la soya, el maíz, el algodón y la canola. Con ello, se ha logrado producir especies con mayor resistencia a ciertos tipos de plagas, pesticidas o sequías; además, en el caso del arroz se ha incrementado el contenido de vitamina A. Relativamente pocos países producen cultivos transgénicos; los principales son: Estados Unidos de América, Argentina, Brasil, Canadá, China y la India, donde se permite exclusivamente el cultivo de algodón transgénico. Entre las empresas dedicadas a la producción de semillas transgénicas destacan Monsanto-Bayer, Novartis, AstraZeneca, Pioneer Hi-Bred, Rhone Poulenc, DuPont y Syngenta, las cuales son objeto de múltiples desacuerdos. Por ejemplo, destaca el gran debate sobre la venta de semillas transgénicas llamadas *Terminator*, las cuales, aunque favorecen la producción y no permiten la cruce con especies silvestres, están genéticamente modificadas para ser estériles, de manera que no se puede obtener un segundo cultivo a partir del producto cosechado; así, las empresas propietarias se aseguran de obligar a las personas que cultivan a consumir nuevamente su producto después de cada cosecha.

Algunas personas y organizaciones están en contra de que las especies genéticamente modificadas acaben siendo propiedad privada y también alertan sobre el uso de grandes monocultivos, susceptibles a nuevas plagas. Pero el punto más controversial es que, a pesar de que los productos transgénicos se usan en numerosos países, los efectos de su consumo no se han analizado a largo plazo, y aún no se conocen los riesgos o beneficios en la fisiología humana o en el ecosistema. Por ejemplo, aunque es claro que la disminución del uso de pesticidas evita la exposición a sustancias tóxicas, además de reducir los efectos indeseables en algunos insectos o polinizadores, el uso de especies resistentes a pesticidas podría inducir el desarrollo de nuevas plagas que se vuelvan

perjudiciales, tanto para los cultivos tradicionales como para los modificados.

■ Animales genéticamente modificados

■ Por otra parte, el desarrollo de ganado genéticamente modificado ha mostrado ser potencialmente productivo y favorecedor, ya que promueve una mayor resistencia a enfermedades, incrementa la **prolificidad**, el rendimiento reproductivo y la tasa de crecimiento, y también permite modificar a conveniencia la composición nutrimental de la carne y la leche, o bien la textura del pelo de los animales genéticamente modificados. De hecho, a la fecha se producen cerdos transgénicos con concentraciones elevadas de ácidos grasos omega-3 (considerados benéficos), y se espera que el consumo de carne animal con menos grasa pueda tener repercusiones positivas en la salud.

De esta manera, las aplicaciones potenciales de la biotecnología en la producción ganadera son muy amplias, y su utilidad solamente está limitada por nuestro propio conocimiento de la función de los genes involucrados y de las interacciones con otros factores. A su vez, el desarrollo de herramientas biotecnológicas continúa a partir del uso de animales transgénicos en los laboratorios de investigación biomédica con múltiples propósitos, por ejemplo:

- Al controlar la expresión de genes asociados al desarrollo del cáncer (oncogenes) en animales transgénicos, se ha podido determinar que su capacidad cooperativa durante el crecimiento y la diferenciación celular es determinante en la formación de tumores.
- El **hipogonadismo**, algunos trastornos de mielinización (como distrofia muscular y miastenia gravis), o bien los trastornos sanguíneos, como la talasemia y la anemia falciforme, son algunos ejemplos de enfermedades estudiadas con animales transgénicos.
- El empleo de ratones, conejos, ovejas y cerdos transgénicos como modelos experimentales ha ayudado a evidenciar la influencia de la hormona de crecimiento y de los genes del factor de

◀ Prolificidad

La media de las crías nacidas por parto, ya sean vivas o muertas.

◀ Hipogonadismo

La disminución de la actividad funcional de los ovarios o los testículos.



crecimiento similares a la insulina sobre el crecimiento y la eficacia alimenticia del ganado.

- Una aplicación importante de los transgénicos es la producción de proteínas terapéuticas para uso clínico en humanos, mediante los llamados bio-reactores, que básicamente son organismos de una especie diferente. Hoy se usan técnicas de ingeniería genética para producir proteínas de cualquier animal, planta o especie bacteriana en la leche de mamíferos como ratones, conejos, cerdos, cabras y ovejas. Algunos ejemplos de proteínas con valor farmacéutico que se pueden producir en una especie distinta de la especie de referencia (heteróloga) incluyen: el factor de coagulación de la sangre humana IX, que está deficiente en pacientes hemofílicos; la antitripsina 1, que se utiliza para el tratamiento del enfisema; la proteína C, usada para inhibir la formación de coágulos sanguíneos; la albúmina sérica humana, que sirve como sustituto de la sangre; así como algunos **antígenos** de hepatitis, útiles para la producción de vacunas. Asimismo, es posible inducir la expresión de proteínas en otros fluidos biológicos, como orina, saliva o sangre terapéuticas, y también en los huevos de gallina.
- Un uso potencial exclusivo del ganado transgénico es para la producción de células, tejidos u órganos que expresen antígenos humanos y faciliten el trasplante entre especies. En los cerdos,

por ejemplo, se pueden producir células pancreáticas para generar insulina, células dopaminérgicas útiles en el tratamiento de la enfermedad de Parkinson, hemoglobina humana que puede usarse como sangre artificial, células madre hematopoyéticas para tratar la leucemia o anemia, además de corazones, pulmones, riñones, hígados y córneas útiles para el trasplante de órganos.

- Los animales transgénicos también se utilizan para probar nuevos medicamentos o productos, ya que se incrementa la eficacia del experimento al usar modelos que expresan transgenes inducidos con el propósito de conocer la interacción entre el fármaco y el blanco terapéutico específico.

Así, los usos de la tecnología transgénica en los sistemas biológicos de ingeniería genética son múltiples y sólo están limitados por la creatividad y la ética de los grupos de investigación.

■ ■ ■ Otros organismos transgénicos

- En la naturaleza existen organismos que tienen eliminada una secuencia génica, lo que en algunas ocasiones genera patologías. Asimismo, la eliminación de secuencias génicas también se induce con fines experimentales, mediante técnicas de ingeniería genética, para generar los llamados animales *knock-out*, con el fin de inducir un efecto específico que

Antígeno
Una sustancia extraña no reconocida por el sistema inmune.

podría modificar la fisiología celular del organismo portador.

De forma natural también existen organismos quiméricos que portan células con distinto ADN; el ser vivo resultante posee entonces dos tipos de células diferentes, cada una con distinta constitución genética. Por ejemplo, un tipo de ADN se puede encontrar en fluidos como la sangre o la saliva, mientras que el segundo tipo de ADN se encuentra en tejidos internos, como en los órganos. En algunos animales, como gatos, langostas, periquitos australianos e incluso humanos, y también en las plantas, se ha reportado este fenómeno, aunque es extremadamente raro. Se cree que estas quimeras resultan de la fusión de dos organismos diferentes que en algún momento convivieron en el útero materno; por ejemplo, cuando dos mellizos se fusionan en uno durante una etapa muy temprana del desarrollo embrionario.

Los avances recientes en el uso y la manipulación de las **células no diferenciadas**, también llamadas células madre, han abierto la posibilidad de analizar la función de diversas células y tejidos humanos en animales hospederos (véase la Figura 3), con lo cual se han obtenido quimeras que ya han permitido, por ejemplo, en cerdos, generar órganos trasplantables y específicos para humanos.

Riesgos potenciales de los organismos genéticamente modificados

A medida que las quimeras se transforman de famosas bestias de la mitología griega a herramientas de investigación científica, se revelan los secretos de la biología del desarrollo y la divergencia evolutiva. Sin embargo, aunque estas líneas de investigación tienen un amplio potencial, también plantean problemas éticos únicos y un posible riesgo que debe considerarse.

Interacciones génicas no deseadas

Algunos animales que consumen alimentos transgénicos muestran diferencias en el peso, lo que podría deberse tanto a un efecto secundario del gen modificado, como a efectos colaterales inducidos por el evento de transformación génica que de manera indirecta modifican el metabolismo celular.

Desarrollo de cáncer

Esto puede ser inducido cuando los cultivos genéticamente modificados llegan a retener una mayor cantidad de residuos de pesticidas que, por lo general, se asocian al cáncer y otras patologías severas.

Células no diferenciadas

Aquellas que aún no "deciden" si van a ser sanguíneas, nerviosas, de riñón, de hígado o de otro tipo; también conocidas como células madre.

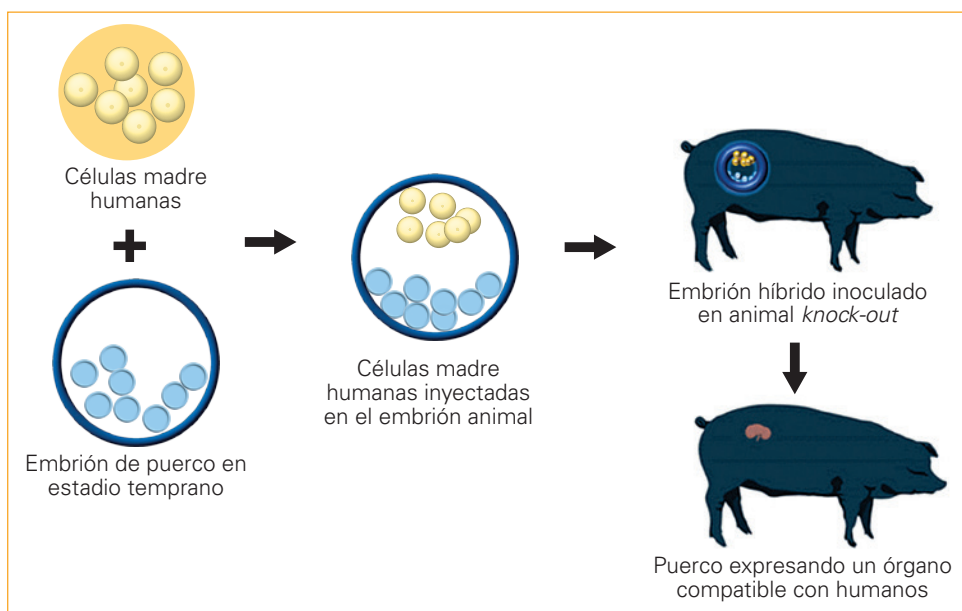


Figura 3. Esquema representativo de la generación de animales quiméricos. Un puerco deficiente de un órgano (*knock-out*), al inocularse con un embrión híbrido que expresa células madre humanas, puede procrear un puerco con un órgano que pudiera ser trasplantable a una persona.

Incremento de alergias

La alergia puede ser causada por la expresión de nuevas proteínas o porque al interactuar con las proteínas expresadas naturalmente se produce el alérgeno, una sustancia que induce la reacción de hipersensibilidad.

Transferencia horizontal de genes

Este fenómeno se refiere a la transferencia y expresión del material genético entre individuos que no forman parte de la misma descendencia. Esto ocurre en la naturaleza de una manera controlada y restringida por los mecanismos celulares y se hace especialmente evidente en el hecho de que algunos virus que sólo atacaban a ciertas especies animales se adaptan hasta poder atacar a otras especies, como la humana. Éste es el caso del origen propuesto de enfermedades como el ébola o el sida, por lo que existe gran controversia acerca de si el uso de organismos genéticamente modificados podría o no inducir la adaptación de más patógenos.

Resistencia a antibióticos

La incorporación de genes que inducen la resistencia a los antibióticos es frecuentemente utilizada para identificar organismos que adquieren características adicionales al ser modificados genéticamente. Se propone que la resistencia a antibióticos puede ser transmitida por transferencia horizontal de genes desde el alimento genéticamente modificado a las bacterias intestinales que degradan el producto ingerido liberado durante la digestión.

Riesgos ambientales

De manera general, el ambiente resulta vulnerable a los organismos genéticamente modificados porque la toxicidad inducida para plantas o animales podría diseminarse indiscriminadamente si no se manipulan los transgénicos en instalaciones controladas.

Atentados contra la biodiversidad

Mediante la evolución, las especies han sufrido modificaciones genéticas espontáneas al incorporar, eliminar o modificar genes que, después de un periodo de adaptación del organismo, han originado nuevas

especies. En el caso de los organismos genéticamente modificados en los cuales un gen exógeno se ha insertado en un organismo receptor, la expresión del nuevo gen origina una cadena de reacciones que provocan alteraciones celulares que pudieran ser tóxicas o letales para el organismo receptor. Otro punto crítico de controversia es que las especies genéticamente modificadas pueden llegar a cruzarse con las especies silvestres, lo cual afectaría la selección natural de los cultivos adaptados a un determinado ecosistema.

Incremento de las diferencias sociales

También se argumenta que las políticas referentes al uso de organismos transgénicos son desfavorables para los países en desarrollo, por las siguientes razones:

- Las innovaciones son inaccesibles para la mayoría de las personas.
- Las semillas genéticamente modificadas pueden causar el decremento de la producción alimenticia, el desempleo de agricultores y la extinción de cultivos originarios de estas regiones.
- Los costos de mantener los campos de cultivo podrían disminuir si se permitiera emplear más productos químicos, ya que aproximadamente 80% de las semillas modificadas son únicamente resistentes a herbicidas.
- El enfoque actual en las aplicaciones de organismos genéticamente modificados podría frenar los esfuerzos por explorar nuevas alternativas para mejorar los campos de cultivo y la producción agrícola.
- En ocasiones, no se respeta la autonomía de las personas responsables del cultivo para decidir si prefieren los productos no modificados genéticamente, ya que es inevitable el riesgo de diseminación del polen o las semillas que pudieran mezclarse con los cultivos nativos u orgánicos.

Si bien la investigación científica puede modificar genéticamente muchos productos potencialmente útiles o de mayor beneficio, la promesa hecha a la sociedad de optimizar los productos naturales no se podría volver realidad a menos que se desarrollaran

estrategias, directrices y regulaciones para que los organismos transgénicos se introduzcan de una manera segura y eficiente en el mercado. Así, mientras la controversia continúa, al grito de “¡Buenas!” o “¡Lotería!” con el diablito o la sirena, esperamos pronto poder definir si los transgénicos son benéficos o perjudiciales para la humanidad y el ecosistema.

Sofía Navarrete González

Universidad Juárez del Estado de Durango.
anasofng@gmail.com

Yuvia Contreras Rocha

Universidad Juárez del Estado de Durango.
yuvia.andrea@hotmail.com

Angélica López Rodríguez

Universidad Juárez del Estado de Durango.
angelica.lopez@ujed.mx

Lecturas recomendadas

- Hermerén, G. (2015), “Ethical considerations in chimeric research”, *Development*, 142(1):3-5.
- Hug, K. (2008), “Genetically modified organisms: do the benefits outweigh the risks?”, *Medicina (Kaunas)*, 44(2):87-99.
- Kyndt, T., D. Quispe, H. Zhai, R. Jarret, M. Ghislain, Q. Liu, G. Gheysen y J. F. Kreuze (2015), “The genome of cultivated sweet potato contains *Agrobacterium* T-DNAs with expressed genes: An example of a naturally transgenic food crop”, *Proc Natl Acad Sci*, 112(18):5844-5849.
- Lai, L. *et al.* (2006), “Generation of cloned transgenic pigs rich in omega-3 fatty acids”, *Nature Biotechnology*, 24:435-436.
- Pardo, A. y M. Selman (2002), “Los animales transgénicos en el progreso de la investigación biomédica”, *Ciencia*, 53(1):43-48.
- Sánchez, F. (2002), “Las plantas transgénicas: retos en la era posgenómica”, *Ciencia*, 53(1):35-42.
- Wheeler, M. B., E. M. Walters y S. G. Clark (2003), “Transgenic animals in biomedicine and agriculture: outlook for the future”, *Anim Reprod Sci*, 79(3-4): 265-289.

Lorena Paola Herrera, Mara de Rito y Jonathan von Below

Vínculo de la **especie humana** con la **naturaleza**

A lo largo de la historia, la especie humana ha experimentado una gran desconexión con el entorno del cual forma parte. En consecuencia, los problemas ecológicos y la falta de respeto y cuidado hacia la vida han aumentado. Mediante una encuesta, identificamos algunas claves para fortalecer el vínculo con la naturaleza y comprender una parte de nuestras acciones cotidianas para cuidar el ambiente.

La conexión con la naturaleza se define como un estado de conciencia que integra lo cognitivo (relacionado al conocimiento o a la información), lo afectivo (el amor por la vida), lo experiencial (vivencia en la naturaleza) y la acción (cuidado del ambiente) (Zylstra y cols., 2014). Es decir, una persona en sintonía con los tres primeros rasgos puede aumentar su empatía y amor hacia la naturaleza y, entonces, actuar a favor de su conservación (Zylstra y cols., 2014). Muchas investigaciones muestran que las personas que se perciben “en conexión” con la naturaleza tienen una mayor preocupación y un comportamiento responsable hacia el cuidado del ambiente (Kals y cols., 1999).

El vocablo *naturaleza* proviene del latín *natura*, que significa “natural”, lo cual hace referencia a todo lo que está creado de manera natural en el planeta (en relación no sólo con los seres vivos, sino también con el clima, el suelo, las formas de la tierra, etcétera). La palabra *natura*, a su vez, se deriva del verbo en latín *nasci*, que significa “nacer”. Entonces, la naturaleza no sólo corresponde a los elementos naturales que vemos a nuestro alrededor, sino también a los procesos que les dieron origen (condiciones físicas del ambiente, interacciones, entre otros). En este sentido, entendemos también que naturaleza son aquellos espacios que la humanidad ha ido diseñando y creando, como las plazas y los parques en las zonas urbanas.

En el transcurso de la historia, como humanidad hemos perdido nuestra conexión con la naturaleza, lo cual nos llevó a tener una menor sensibilidad hacia la vida y a desvincularnos de nuestro propio ser. Esto es consecuencia de la historia de vida, la influencia del lugar donde nacimos y los legados ancestrales, que modifican nuestras percepciones, costumbres y creencias. A partir de esto, tomamos decisiones y llevamos a cabo al menos una parte de nuestras acciones, muchas



de las cuales afectan a la naturaleza, impactan los paisajes y generan desequilibrios en los ecosistemas. Para mitigar estos impactos se han implementado numerosos programas de conservación y planificación territorial en todo el mundo durante las últimas décadas (Mace, 2014); sin embargo, muchos de estos impactos aun así no llegan a ser compensados. Para superar esto, además de cambiar nuestras actitudes cotidianas, es necesario modificar nuestras formas de pensar, de actuar y de tomar plena conciencia de que dependemos completamente de la naturaleza (véase el Recuadro 1).

Nuestra conexión con la naturaleza en la actualidad
Registrar las maneras en que las personas percibimos nuestra relación con el entorno es un pri-

mer paso para comprender muchas de las acciones cotidianas. Para ello, desarrollamos una encuesta orientada a identificar algunas claves para fortalecer nuestro vínculo con la naturaleza. Entre otras cosas, exploramos qué entienden las personas por “conexión con la naturaleza”, una pregunta que nos puede orientar a entender cómo se relacionan con ella. ¿Nos percibimos como parte de la naturaleza o como naturaleza misma? ¿La naturaleza es “algo” externo a las personas? ¿Estar en conexión con la naturaleza es simplemente estar presentes en espacios abiertos o también incluye el cuidado y el respeto por la vida?

En esta encuesta obtuvimos las respuestas de 424 personas de distintos países, la mayoría de Argentina (339). A partir de las definiciones que expresaron, agrupamos una serie de categorías (véase la Figura 1), pudiendo pertenecer una misma definición a cate-

Recuadro 1. La especie humana ha evolucionado en espacios abiertos

Por cerca de dos millones de años, a pesar de gozar de importantes ventajas, como un cerebro grande, el uso de utensilios y estructuras sociales complejas, nuestra especie permaneció como una criatura débil en el ecosistema reinante (Harari, 2014). Vivía con temor a los depredadores y subsistía principalmente de recolectar plantas, capturar insectos y cazar animales pequeños. Para sobrevivir, necesitaba conocer su territorio, la dinámica de crecimiento de las plantas, las costumbres de cada animal, cuáles alimentos eran nutritivos, cómo podía usarlos para la cura o cuándo y cómo se presentaban los cambios estacionales. Todos estos conocimientos y experiencias diarias

llevaron a la especie a estar muy conectada con el entorno natural. Sin embargo, su rápida evolución condujo, en muy poco tiempo, a estar en la cima de la cadena alimentaria, lo cual cambió la forma de conectarse con el entorno. La naturaleza pasó a ser “controlada” mediante la agricultura y la domesticación, que evolucionó hacia la actual producción industrial, muy lejos de regirse por las leyes universales de la naturaleza y el respeto por toda la vida —incluida la humana— (Harari, 2014). Este escenario es el que domina hoy y, en parte, es el responsable de los innumerables problemas ambientales que afectan a nuestro planeta.

gorías distintas. Las más frecuentes se asociaron al “buen vivir y al bienestar” (34%), al “sentido de cuidado y respeto” (32%), a una visión “trascendente” de la naturaleza (21%) —entendida como un estado de expansión de conciencia—, y a “sentirse/ser parte” de ella (19%). El beneficio percibido por las personas al estar en espacios abiertos podría ser importante porque aumentaría la conciencia del cuidado y la acción para el bien común. Los modelos teóricos muestran que además de realizar paseos y conectar con las emociones, para tener un vínculo

con la naturaleza, también es necesario generar acciones de concientización, cuidado y conservación (véase el Recuadro 2).

En esta encuesta las personas manifestaron estar de acuerdo o no con ciertas declaraciones acerca de su conexión con la naturaleza a partir de una escala Likert, la cual varía en un rango de 1 a 5, en el que 1 es igual a estar muy en desacuerdo con la afirmación; 2, en desacuerdo; 3, ni en acuerdo ni en desacuerdo; 4, en acuerdo; 5, muy en acuerdo. La Figura 2 muestra cómo se distribuyeron las respuestas en

Buen vivir y bienestar: "Disfrutar sin arruinar. Carga de energía, paz y placer. Contemplación. Bienestar"	En relación de respeto, cuidado y coexistencia: "Ser conciente de su existencia haciendo lo que esté al alcance para cuidarla en actitudes cotidianas"	Trascendente: "Comunión con el entorno desde una conexión íntima hasta la libre expansión"	Estar presente o hacer actividad en espacios abiertos: "Tomar mate abajo de un árbol"	Tener consciencia de ella y aprender de sus características: "Ser conciente de que sin ella no hay vida"	Conexión con una misma/o: "Estar en conexión conmigo mismo"
		Incluyente - El ser humano como parte o como naturaleza: "Sentirme parte de la naturaleza"	Sentir, percibir, contemplar: "Disfrutar en un espacio natural, relajarse, sentir los sonidos, los olores, disfrutar del paisaje"	Incluyente. El ser humano en conexión con algo más, con la vida, con otros seres vivos: "Estar en contacto con el mundo que nos rodea"	Interacción con otros seres y el ambiente* Antropocéntrica**

Figura 1. Once categorías de las definiciones sobre “conexión con la naturaleza” y ejemplos de las respuestas (enmarcados entre comillas). El tamaño de las cajas indica la frecuencia de aparición de cada categoría en el total de respuestas (424). *Ejemplo de la categoría correspondiente: “Intercambiar energía y materia con el ambiente”. **Ejemplo de la categoría correspondiente: “Disfrutar de los beneficios que me aporta, mejorando mi bienestar”.

Recuadro 2. Los beneficios de conectarse con la naturaleza

Si bien es recomendable estar en contacto el mayor tiempo posible con la naturaleza, numerosas investigaciones demuestran que en nuestro organismo se presentan cambios sustanciales, incluso cuando damos un breve paseo por espacios con la menor urbanización posible (parques, bosques, reservas naturales, marismas, etcétera) (Selhub y Logan, 2012). Algunos de los beneficios en el ámbito físico y mental de frecuentar los espacios naturales son:

- Un fortalecimiento del sistema inmunológico, debido a que los árboles segregan sustancias volátiles de defensa (antimicrobianas), llamadas fitoncidas, responsables de aumentar en la sangre un tipo de glóbulos blancos que contribuyen a eliminar las infecciones y reforzar el sistema inmunológico.
- Una mayor producción de vitamina D, esencial para el funcionamiento del organismo, pues 90% de esta ftohormona se sintetiza en la piel por la exposición a los rayos ultravioleta B (UVB) de la luz solar.
- Una mejoría de algunos de los marcadores fisiológicos del estrés, como un descenso de la presión arterial, una mejor circulación y actividad del sistema nervioso, así como un bajo nivel de cortisol —la hormona del estrés—, entre otros.
- Una mayor prevención de la fatiga mental y una mejora general de la función cognitiva, asociada a la capacidad perceptiva, la memoria y la creatividad. Esta afectación mental es el resultado del esfuerzo excesivo para hacer funcionar el cerebro en el entorno urbano actual.
- Una mayor producción de serotonina —llamada también la hormona de la felicidad—, sustancia química responsable de mantener en equilibrio nuestro estado de ánimo y que en especial se estimula por la exposición a la luz del sol.
- Una reducción de los síntomas del trastorno por déficit de atención con hiperactividad; es decir, la dificultad que presentan muchas personas en la infancia para concentrarse en sus tareas, prestar atención, estar en calma y controlar el comportamiento impulsivo.

función de esta escala para tres de las declaraciones. Se observa que dominaron las respuestas “En acuerdo” y “Muy en acuerdo” en un valor mayor de 80%, lo que sugiere que las personas que respondieron a la encuesta perciben que están, en mayor o menor medida, en conexión con la naturaleza.

Ahora bien, ¿tendrán estas personas un comportamiento a favor del ambiente? Los resultados mostraron que un alto porcentaje de las personas que respondieron estar de acuerdo y muy de acuerdo en cuanto a la conexión también manifestaron que cuidan el consumo de agua (77%), separan los residuos en su domicilio (76%) y consumen alimentos agroecológicos a veces o con frecuencia (76%). Por otro lado, un menor porcentaje de estas personas que dice sentirse en conexión y feliz al estar en espacios abiertos hace composta en sus casas (36%), procura no utilizar productos químicos que impactan el ambiente (27%) y no compra productos envueltos con exceso de papel y plás-

tico (23%). Una proporción menor de personas de este grupo (16%) colabora con organizaciones no gubernamentales (ONG) dedicadas a causas ambientalistas.

Cabe hacer notar que las respuestas de la encuesta que se refieren a las actitudes o los comportamientos

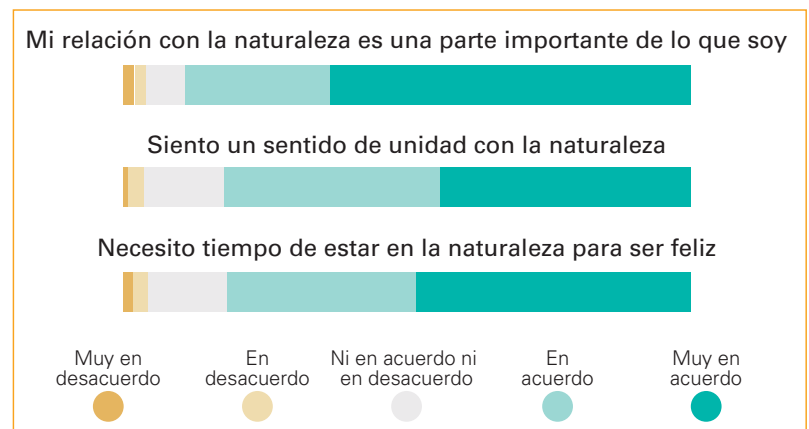


Figura 2. Declaraciones sobre la conexión con la naturaleza y niveles de “acuerdo” que expresaron las personas encuestadas (424 en total).

a favor del ambiente no fueron homogéneas. Mientras que se han incorporado ciertos hábitos, otros son más ajenos y quizá no dependan completamente de la propia persona.

Por ejemplo, la separación de residuos en casa, si bien presentó un alto porcentaje de afirmaciones (“Sí, separo residuos”), depende en parte del compromiso que el municipio o la ciudad tenga con respecto a la gestión de los residuos, si se encarga del reciclado o de promover y controlar la separación. De hecho, las personas que no separan los residuos argumentaron estar interesadas, pero el municipio no se responsabiliza de la actividad. Asimismo, la realización de composta es menos frecuente; muchas de las personas que no la implementan dijeron que no tienen un lugar para hacerlo. Por otra parte, la compra consciente de productos con poco o sin envoltorio está aún menos incorporada; gran parte de lo que consumimos viene cubierto de manera excesiva con plástico, papel o cartón, ya sea como medida de protección o como método atractivo para incentivar su compra, pero pocas veces consideramos este aspecto. Así, de manera contrastante, tenemos más conciencia de separar los residuos en casa, o incluso de hacer composta, pero no de evaluar si compramos o no productos con poco o sin envoltorio.

En tanto, es alentador saber que el cuidado y consumo responsable del agua está más incorporado en las prácticas cotidianas, a partir de un mayor alcance de la información que permite tomar conciencia de las situaciones de conflicto por su distribución y acceso desde hace varios años. Esto se hace patente en los ambientes secos, donde el agua escasea, pero también en los lugares con climas húmedos, que presentan otros problemas de agua. En contraste, contamos con menos información acerca del impacto de los productos químicos usados en los insumos domiciliarios, o bien con respecto al tema de la alimentación agroecológica, lo cual no sólo se asocia con nuestra salud, sino con formas sustentables de producción en íntima relación con la conservación y la conexión con la naturaleza. Esto se ve reflejado en el bajo porcentaje de personas que dicen atender el asunto del impacto de los productos que compran y utilizan. En una proporción considerable, las personas encuesta-

das respondieron que consumen alimentos agroecológicos a veces o frecuentemente, lo cual habla de una mayor conciencia del tema; pero, entre quienes no lo hacen, se argumenta que tienen un costo elevado, además de la dificultad de conseguir ese tipo de productos en sus ciudades o porque falta mayor variedad.

Por último, en la encuesta incluimos una pregunta relacionada con la colaboración económica hacia organizaciones ambientalistas. La baja participación entre las personas encuestadas fue justificada por la dificultad de aportar dinero, seguida de la falta de confianza en las ONG y por el hecho de que prefieren otras formas de colaborar para la conservación, por ejemplo, mediante voluntariados.

■ ■ ■ ¿Hacia dónde se dirige nuestra conexión con la naturaleza?

■ Esta pregunta quizá tenga múltiples respuestas. Como humanidad, nos queda mucho camino por recorrer, pero lo estamos haciendo. Así, consideramos importante detenernos en lo simple y cotidiano, en las acciones diarias. La naturaleza es sinónimo de bienestar y se presenta de innumerables formas; no solamente la podemos encontrar en nosotros y nosotras, sino en cualquier espacio (el patio de nuestra casa, los parques de una ciudad). En otras palabras, no hace falta viajar a lugares remotos y más vírgenes para conectarnos con el entorno.

Cabe agregar que dedicar un tiempo para pasear en la naturaleza trae innumerables beneficios, en lo físico y lo mental, así como también en lo emocional y lo espiritual. Si a esto le sumamos la contemplación, la meditación y el sentir junto a la naturaleza (véase la Figura 3), podemos abrir un mundo nuevo de sensaciones y ampliar nuestra conciencia.

El concepto que las personas tienen de la “conexión con la naturaleza” es variado, lo cual refleja una gran diversidad de percepciones, de las cuales se deriva una serie de acciones con distintas intensidades en cuanto al comportamiento a favor del ambiente; en general, las respuestas relacionadas con estos aspectos fueron positivas, más para ciertos temas (separación de residuos, cuidado del agua) y cada vez con mayor preocupación por otros (produc-



Figura 3. Vivencias de contemplación, de meditación y de conexión con la emoción en la naturaleza. Fotos: David Díez Sánchez y Lorena Herrera.

tos sin envoltorios, alimentos agroecológicos). Esto demuestra las buenas intenciones por favorecer una conciencia colectiva. Adicionalmente, observamos que las emociones y el afecto que podemos sentir cuando estamos en los espacios naturales puede traducirse en acciones de cuidado hacia la vida; y aunque se necesita una mayor dedicación, estamos en el camino.

Lorena Paola Herrera

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina.
lherrera@mdp.edu.ar

Mara de Rito

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina.
derito.mara@gmail.com

Jonathan von Below

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina.
fombis.von@gmail.com

Referencias específicas

- Harari, Y. N. (2014), *Sapiens. De animales a dioses. Breve historia de la humanidad*, Barcelona, Debate.
- Kals, E., D. Schumacher y L. Montada (1999), "Emotional affinity toward nature as a motivational basis to protect nature", *Environmental Behavior*, 31:178-202.
- Mace, G. M. (2014), "Whose conservation?", *Science*, 345:1558-1560.
- Selhub, E. y A. Logan (2012), *El poder curativo de la naturaleza*, Barcelona, RBA Libros/Integral.
- Zylstra, M., A. Knight, Y. Eslerk y L. Le Grange (2014), "Connectedness as a core conservation concern: an interdisciplinarity review of theory and a call for practice", *Springer Science Reviews*, 2:119-143.

Abraham Omar Rivera Ramírez, Blanca Inés García Gómez y Édgar Dantán González

El extraño caso de las proteínas multifuncionales

La frase “una proteína, una función” tiene que ser modificada a la luz del conocimiento actual. El estudio de las proteínas multifuncionales, también llamadas *moonlighting*, contribuye a entender los intrincados acertijos celulares. Éste es uno de los casos más extraños de actividad multifuncional o, como así lo plasmara Stevenson para referirse a Jekyll y Hyde, con trastorno de personalidad múltiple.

La famosa novela *El extraño caso del Dr. Jekyll y Mr. Hyde*, publicada por Robert Louis Stevenson en 1886, es una representación vívida de un trastorno psiquiátrico que hace a una misma persona tener doble personalidad, en muchas ocasiones opuestas entre sí. Tal es el caso del distinguido Dr. Henry Jekyll, quien es investigado por su amigo John Utterson, un famoso abogado londinense, por la extraña relación de Jekyll con una serie de homicidios perpetrados por el misántropo y siniestro Edward Hyde. La historia se desarrolla con sinuosas peripecias y hechos innegables, los cuales van llevando a Utterson a creer que Jekyll y Hyde son la misma persona. La novela acaba con la confesión (en una carta) de Jekyll, en la cual relata que se dio cuenta de que todos los humanos tenemos dos personalidades, que en nuestro interior habita esa dualidad inherente del bien y el mal, y que él sintió que debía separarlas para romper las cadenas que tenían entre sí. Para ello, inventó una fórmula que lo transformó en otra persona, separando la mitad buena de la mala y quedándose con esta última. Cierra la confesión avisando de su suicidio, a la vez homicidio de Hyde.

A pesar de que en 1941 George Beadle y Edward Tatum nos legaron uno de los principios básicos de la genética moderna: “un gen, una proteína”, hoy sabemos, a la luz de los nuevos descubrimientos y el avance del conocimiento, que esto no corresponde exactamente con la realidad. En el mundo de las macromoléculas, las proteínas tienen la mayor diversidad estructural y funcional dentro de la célula, y en ellas puede presentarse un fenómeno análogo al trastorno de personalidad múltiple, conocido como *moonlighting*, que en inglés se refiere a las personas que, además de sus ocupaciones cotidianas durante el día, tienen un segundo empleo por la noche.



Este fenómeno en las proteínas se reconoce como la capacidad que tienen para llevar a cabo múltiples funciones –o poseer varias personalidades que afectan su comportamiento– que, por lo general, no tienen relación alguna. Las múltiples funciones que desempeñan las proteínas de este tipo no se deben a fenómenos de fusión génica, a la actividad de fragmentos de origen proteolítico ni a variantes generadas por **splicing** (empalme de genes). Tampoco se consideran proteínas *moonlighting* a miembros de una familia de homólogos proteicos (isoenzimas) que llevan a cabo diferentes funciones, ni a aquellas proteínas que participan en múltiples funciones celulares pero que siempre desempeñan la misma función bioquímica.

Splicing
Proceso cotranscripcional (paso de ADN a ARN) en el que se remueven las secuencias intrónicas y se empalman únicamente las regiones codificantes.

Las primeras personas que observaron el fenómeno y reportaron que una proteína podría tener más de una función fueron Joram Piatigorsky y Graeme Wistow, quienes trabajaban en el Instituto Nacional para la Vista, de los Institutos Nacionales de Salud de Estados Unidos de América. En 1989, encontraron que las proteínas estructurales del lente ocular (cristalino) en aves y reptiles se conformaban principalmente por enzimas relacionadas con el metabolismo de estos animales, como la argininosuccinato liasa, involucrada en el ciclo de la urea, la lactato deshidrogenasa, que participa en el metabolismo anaerobio de la célula, y la α -enolasa, perteneciente a la **glucólisis**. Piatigorsky inicialmente acuñó el término *gene sha-*

Glucólisis
Ruta metabólica encargada de oxidar la glucosa con el fin de extraer energía para el metabolismo celular.

ring (“compartir genes”) para describir el fenómeno; pero no fue hasta 1995 que Robert M. Campbell y Colin G. Scanes utilizaron por primera vez el vocablo *moonlighting* cuando describieron ciertos neuropéptidos que presentaban actividad inmunomoduladora y, a su vez, llevaban a cabo su función clásica, la comunicación entre células nerviosas. No obstante, es Constance Jeffery, una bióloga estructural de la Universidad de Chicago y pionera en el campo de estudio de estas proteínas, quien ha difundido ampliamente el término (Jeffery, 2014; Jeffery, 2017).

A la fecha, se han caracterizado alrededor de 500 proteínas multifuncionales, como se puede consultar en las bases de datos MoonProt y MultitaskProtDB, donde se encuentran proteínas reportadas en la literatura científica con una sólida evidencia experimental. Este grupo de proteínas no pertenece únicamente a un conjunto particular de organismos, sino que se han encontrado en los tres dominios de la vida (eucariontes, bacterias y arqueas), e incluso existen evidencias de proteínas virales con esta doble actividad (véase la Tabla 1).

Evolución de las proteínas multifuncionales

¿Cómo una proteína pudo adquirir, a lo largo de su historia evolutiva, esta doble funcionalidad? Abordar esta cuestión no resulta nada fácil; sin embar-

Tabla 1. Ejemplos de algunas proteínas multifuncionales

Proteína	Organismo	Función principal	Función alternativa
Sulfito reductasa	Planta <i>Pisum sativum</i> (chícharo)	Cataliza la reacción de reducción del sulfito (SO ₃ ²⁻) a ácido sulfhídrico (H ₂ S).	Compacta el ADN de los plástitos en estructuras llamadas nucleoides, para controlar el proceso de transcripción.
Piruvato quinasa	Animal <i>Rattus norvegicus</i> (rata café)	Cataliza la reacción de oxidación del fosfoenolpiruvato a piruvato en la vía glicolítica.	Como monómero, tiene la capacidad de unirse a la hormona tiroidea triyodotironina (T ₃).
Aconitasa	Levadura <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	Cataliza la conversión del citrato en cis-aconitato en el ciclo de Krebs.	Mantiene la integridad del ADN mitocondrial.
GroEL (Hsp60)	Bacteria <i>Enterobacter aerogenes</i>	Previene el plegamiento incorrecto de proteínas, así como asegura el correcto ensamble de polipéptidos.	Toxina paralizante probada en cucarachas del género <i>Blattella</i> .
Endonucleasa I-Tev1	Virus bacteriófago T4	Enzima que se encarga de la transferencia lateral de una secuencia intermedia (intrón) a un alelo que carece de ésta.	Autorrepresor transcripcional.

Fuente: datos tomados y modificados de la base de datos MoonProt 2.0.

go, la manera más simple de responder sería que los organismos evolucionan haciendo uso de lo que ya está disponible. Existen dos hipótesis que no son excluyentes una de la otra para explicar el origen de este fenómeno. La primera dice que las diversas funciones de una proteína dentro de la célula podrían haber estado presentes desde su origen; la segunda sostiene que la proteína podría haber sufrido diversas modificaciones a nivel de secuencia y que esto generó un cambio sustancial en su función (Henderson y cols., 2013).

La primera hipótesis resulta un tanto difícil de reconciliar con la evolución darwiniana, ya que las diferentes funciones sólo podrían mantenerse si estuvieran fuertemente restringidas por la selección natural. Una posibilidad sería que las diversas funciones codificadas en una misma proteína estuvieran superpuestas, a tal punto que realizar una u otra función requeriría de cambios evolutivos sutiles. Ejemplo de lo anterior se da en proteínas sumamente conservadas y ubicuas, como es el caso de las enzimas involucradas en el metabolismo de los carbohidratos (azúcares), y particularmente aquellas que participan en la glucólisis. Se sabe que cinco de las diez enzimas de la vía glicolítica presentan una doble función, por lo que las pequeñas diferencias en su secuencia podrían haber permitido el cambio de una función a otra (Kim y Dang, 2005). El paisaje adaptativo de estas proteínas sería fino, sutilmente delineado, con valles poco pronunciados, pudiendo cruzar rápidamente los picos adaptativos al favorecer una u otra función alternativa.

Con relación a la segunda hipótesis, la cual dice que los cambios de función podrían deberse a una variación sustancial en la secuencia, hablaremos de un caso muy particular: la chaperonina 60 (Cpn60). Esta proteína se encuentra en algunas bacterias completamente desvinculada de su propósito original, que es asistir el plegamiento de proteínas recién sintetizadas o que han sufrido daños estructurales por algún tipo de estrés. No obstante, se ha observado que, en algunos patógenos, la expresión de las diferentes copias de Cpn60 varía a lo largo de los diferentes ciclos de infección, lo cual sugiere que estas variantes o duplicados podrían haber obtenido un cierto grado

de especialización que favoreciera la patogénesis. En este caso, el salto de una función a otra debería requerir muchos más cambios que lo anticipado por la evolución gradual, por lo que el paisaje adaptativo debería ser mucho más definido; esto es, con valles más abruptos y rugosos que indicaran una adaptación más sólida para el desempeño de estas funciones (Henderson y cols., 2013).

Esto podría deberse a que Cpn60 tiene una función esencial en la viabilidad celular, por lo que la acumulación de diversos cambios puntuales dentro de la secuencia sería muy desfavorable para el organismo, al comprometer la supervivencia, al menos que esto se viera favorecido por mecanismos que amortiguaran dichas mutaciones. Uno de estos mecanismos es la duplicación génica, una estrategia altamente recurrente en la historia evolutiva de muchas proteínas. Propuesto por Susumo Ohno en 1970, este mecanismo consiste en que, después de una duplicación génica, una de las copias, liberada de una mayor presión de selección, puede explorar neutralmente un espectro mucho más amplio de fenotipos o actividades, mientras la otra copia realiza la función ancestral. Si bien la pérdida de la función es el destino más probable para la copia de evolución libre, debido a la naturaleza **estocástica** de las mutaciones, también existe la probabilidad sumamente baja de un pequeño número de casos exitosos que pudieran dar origen a nuevas funciones.

Otra de las interrogantes que surge sobre estas proteínas es acerca de los beneficios que le aportan a la célula u organismo. Existen diversas formas en las que las proteínas multifuncionales podrían dar como resultado una ventaja evolutiva; no obstante, el mayor de los beneficios sería que al poseer proteínas con múltiples funciones un organismo tendría menos proteínas que sintetizar y, consecuentemente, menos ADN que replicar, así como coordinar la expresión de un menor número de genes, lo que disminuye enormemente el gasto de energía en sintetizar moléculas similares y evita errores en la expresión génica y en la acumulación de mutaciones: esto se traduce, a su vez, en un ahorro de energía sustancial durante el crecimiento, así como en el desempeño general del organismo.

Estocástico
Proceso cuyo comportamiento no es determinista e involucra acciones predecibles como elementos aleatorios.

Mecanismos que regulan la doble vida de una proteína

Las múltiples funciones que lleva a cabo una proteína *moonlighting* parecen agregar una dimensión extra a la –ya de por sí intrincada– complejidad celular. Para tener una idea del alcance de esto, hasta antes del año 2000 se enseñaba en los libros especializados que el genoma humano debería albergar cuando menos de 100 000 a 150 000 genes; sin embargo, un hecho sorprendente fue el haber encontrado únicamente alrededor de 30 000 de éstos. Si ahora hiciéramos el ejercicio mental de extrapolar el número de funciones llevadas a cabo por una célula humana, en relación con el número de proteínas codificadas en los genes, encontraríamos que las proteínas no alcanzarían para realizar todas las funciones posibles de una célula. Podríamos decirlo hasta en forma de proverbio: “muchas funciones, pocas proteínas y menos genes”.

El encendido o activación de una función alternativa en una proteína puede ser consecuencia de diversos factores, como son el estado oligomérico, los cambios en la localización celular, el tipo de célula que expresa la proteína o las variaciones en la concentración de algún **ligando**, **cofactor** o producto. Aunque existen diferentes formas de alternar entre una función y otra, en muchos de los casos las proteínas utilizan una combinación de métodos para cambiar sus funciones, como explicamos a continuación.

Localización diferencial

Una misma proteína puede desempeñar funciones diferentes variando únicamente su ubicación dentro de



Citocina
Agente de comunicación intercelular que activa los receptores de membrana específicos, responsables de fenómenos como la proliferación y diferenciación celular.

Ligando
Molécula pequeña que se une al centro activo de una proteína y modula su función bioquímica.

Cofactor
Componente no proteico de bajo peso molecular necesario para la actividad de una enzima.

la célula. Uno de los casos más conocidos es el de la enzima fosfoglucosa isomerasa, que cataliza la segunda reacción de la vía glicolítica en el citoplasma de las células humanas. Sin embargo, cuando la misma enzima es secretada al exterior, tiene cuando menos cuatro tareas diferentes. La primera es la función de **citocina**, ya que estimula la maduración de células B del sistema inmune para que se conviertan en células productoras de anticuerpos. Además de esta función como molécula señalizadora, actúa sobre las células nerviosas promoviendo el crecimiento y la supervivencia de neuronas espinales embrionarias (Chaput y cols., 1988). También se ha reportado que tiene actividad como factor de motilidad autocrino, el cual estimula la migración celular en células cancerosas. Por último, se conoce también su papel como un mediador de la maduración y diferenciación celular en células de leucemia mieloide humana (Xu y cols., 1996). Si consideramos que adaptarse de un ambiente intracelular a uno extracelular involucra grandes cambios conformacionales debido a las propiedades químicas del medio, la versatilidad de esta proteína puede entenderse a partir de la segunda hipótesis antes descrita.

Expresión diferencial

La expresión de la proteína en diferentes tipos celulares también es un interruptor que activa una función u otra. Por ejemplo, la neuropilina es una proteína que actúa como un receptor de superficie celular en células endoteliales, donde lleva a cabo la detección del factor de crecimiento vascular-endotelial que estimula el desarrollo de nuevos vasos sanguíneos, y también es un sensor que se encarga de indicar el momento en el que las células del torrente sanguíneo necesitan ser renovadas. No obstante, cuando esta proteína es expresada en los axones de las células nerviosas, aunque se encuentra igualmente como un receptor de superficie, también detecta la presencia de un ligando diferente –la semaforina III– y, en conjunto, ambas proteínas se encargan de dirigir el crecimiento axonal.

Oligomerización

Algunas proteínas tienen una actividad enzimática como monómeros (una sola proteína) y otra muy

diferente como oligómeros (la asociación de dos o más unidades proteicas idénticas). La gliceraldehído 3-fosfato deshidrogenasa humana, una enzima glicolítica, cuando se encuentra en su forma tetramérica (cuatro unidades de esta misma proteína), lleva a cabo la conversión del gliceraldehído 3-fosfato a 1,3-difosfoglicerato en dicha vía metabólica. Sin embargo, cuando se encuentra como monómero, esta proteína se internaliza en el núcleo de la célula, donde lleva a cabo una actividad de ADN-uracil glicosilasa, que se encarga de remover uracilos que han sido incorporados accidentalmente al ADN, puesto que es un compuesto exclusivo del ARN.

Concentración de sustrato/ligando

La función de una proteína puede variar de una a otra por la disponibilidad y cantidad de algún elemento indispensable para cada función. La aconitasa es un enzima del ciclo de Krebs que realiza su actividad catalítica únicamente cuando las concentraciones de hierro dentro de la célula son las adecuadas. Cuando la concentración de este metal se ve disminuida, la enzima pierde su actividad catalítica y adquiere un nuevo papel en la célula como una proteína de unión a elementos de respuesta a hierro. Así, es capaz de unirse a la región sin traducir 5' del ARN mensajero de la ferritina, una proteína que se encarga del almacenamiento del hierro intracelular, con lo cual se restablecen los niveles de dicho metal. La aconitasa es entonces una enzima y una proteína de unión a ARN, pero nunca ambas simultáneamente (Basilion y cols., 1994).

Diferentes sitios activos/de unión

El desempeño de múltiples funciones puede darse también por el hecho de tener distintos sitios funcionales que permiten establecer diversas interacciones. Para el caso particular de las enzimas, se denomina sitio activo a la región en el espacio de la proteína donde se llevan a cabo las diferentes reacciones químicas. Un caso sumamente sorprendente es el de la alcohol acetaldehído deshidrogenasa en la bacteria *Listeria monocytogenes*. Dicha enzima está involucrada en el metabolismo oxidativo de compuestos como el etanol, el propionato o el butanoato. Sin

embargo, esta misma proteína también es exportada a la membrana de la célula, donde cumple una función de adhesina, que le da la capacidad a *Listeria* de unirse preferencialmente a células epiteliales del intestino, un paso clave en el desarrollo de la **patogénesis** inducida por este microorganismo (Jagadeesan y cols., 2010).

Formación de complejos

Algunas proteínas forman complejos proteicos que están constituidos por proteínas distintas, a diferencia de los oligómeros formados por proteínas idénticas. Un ejemplo encontrado en la bacteria *Escherichia coli* es la tiorredoxina, la cual es de suma importancia para la síntesis de ribonucleótidos, que son los componentes primarios del material genético. Esta proteína es reclutada por el bacteriófago T7, un enemigo natural que infecta a la bacteria. Posteriormente, la enzima es incorporada como una subunidad a la ADN polimerasa viral, la cual es un complejo proteico trascendental para la replicación del material genético del virus (Mark y Richardson, 1976).

Capacidad insecticida: una actividad multifuncional de GroEL

La chaperonina GroEL conforma un grupo de proteínas encontradas en los tres dominios de la vida y tiene un papel trascendental dentro la célula, ya que es la encargada de plegar proteínas recién sintetizadas o que han sufrido daños estructurales debido a diferentes tipos de estrés, como el químico o el térmico. Sin embargo, además de sus funciones canónicas, se han reportado diferentes actividades alternativas para esta proteína. Las diversas acciones de GroEL pueden dividirse en: 1) funciones intracelulares no relacionadas con el plegamiento de proteínas; 2) localización en la superficie de la célula con función como receptor; 3) interacciones de unión a ligandos dentro o fuera de las células (receptor soluble); 4) cuando ésta es secretada, toma la función como una molécula de señalización intercelular entre una amplia variedad de células (Henderson y cols., 2013). Hasta ahora se ha examinado apenas un pequeño número de proteínas GroEL y, sorprendentemente,

Patogénesis

Proceso por el cual un patógeno (virus o bacteria) produce daño o enfermedad en su hospedero.

no todas exhiben las mismas actividades. Quizá la función más impactante de los miembros de la familia GroEL es la de mostrar actividades tóxicas en contra de eucariontes.

Los mirmeleóntidos (familia Myrmeleontidae), conocidos comúnmente como hormigas león, son depredadores capaces de paralizar a sus presas. En el aparato bucal donde se produce la saliva de la larva, se encuentra una bacteria simbiote, *Enterobacter aerogenes*. Sorprendentemente, en esta bacteria se identificó una proteína GroEL que paralizaba rápidamente y mataba a cucarachas del género *Blattella germanica* cuando éstas eran inyectadas con la proteína (Yoshida y cols., 2001).

Otro ejemplo de GroEL con actividad tóxica se estudió en la bacteria patógena de insectos *Xenorhabdus nematophila*, que se encuentra en estrecha relación de **simbiosis** con nematodos entomopatógenos del género *Sterneinema* y que habita en el intestino de estos organismos. En medios de cultivo de la cepa *X. nematophila* se encontraron vesículas provenientes de la membrana externa que contenían factores insecticidas; entre éstos, una proteína GroEL (XnGroEL) como mayor constituyente. La proteína purificada XnGroEL presentó actividad insecticida en contra del insecto plaga *Helicoverpa armigera*. Adicionalmente, se han reportado actividades insecticidas de homólogos de GroEL en otras especies de *Xenorhabdus* (*X. budapestensis* y *X. ehlersii*); éstas fueron tóxicas contra el insecto polilla *Galleria mellonella* (Kumari y cols., 2013).

Con respecto a lo anterior, cabe recordar que muchos organismos, entre los que se encuentran los nematodos entomopatógenos, forman relaciones muy estrechas con bacterias simbiotes y tienen una historia evolutiva común, por lo que parecería que, en el caso de estas bacterias entomopatógenas, GroEL ha evolucionado como un importante factor de virulencia (Kumari y cols., 2013).

Por otro lado, las toxinas con actividad insecticida provenientes de bacterias no simbióticas también se han descrito ampliamente. Tal es el caso de *Bacillus thuringiensis* (Bt), una bacteria Gram positiva patógena de insectos que produce diferentes factores de virulencia importantes para la patogénesis. Princi-

palmente están las toxinas Cry, capaces de formar estructuras oligoméricas que se dirigen a las células del intestino de las larvas y se insertan en la membrana celular, donde forman poros que inducen la lisis celular por choque osmótico. Hasta el momento, se desconoce el papel biológico de las toxinas Cry para la bacteria, y solamente se ha caracterizado su actividad entomopatógena; en ninguna toxina Cry, u otras toxinas de bacterias no simbióticas, se ha descrito una actividad multifuncional (Pardo-López y cols., 2013).

■ ■ ■ El misterio de la chaperonina GroEL

■ Actualmente, en el Laboratorio de Estudios Genómicos de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (LEE-UAEM), estamos investigando proteínas que provienen de bacterias con un estilo de vida simbiote, íntimamente asociadas con pequeños gusanos microscópicos llamados nematodos, que a su vez tienen la capacidad de infectar y matar insectos. La triada formada por nematodo-insecto-bacteria representa un excelente modelo para estudiar fenómenos de relación simbiótica y coevolutivos, o bien diversos aspectos como los mecanismos que utilizan las bacterias para matar insectos. En este caso, las bacterias poseen la proteína GroEL, la cual auxilia a otras proteínas a estructurarse y también es capaz de matar a las larvas de insectos cuando se administra mediante inyección o por la vía oral. En el LEE-UAEM, utilizamos como modelo de estudio a *Galleria mellonella*, insecto plaga de los panales de abeja, y hemos caracterizado a las proteínas GroEL provenientes de cinco diferentes especies bacterianas (*Alcaligenes faecalis*, *Xenorhabdus nematophila*, *Photorhabdus luminescens*, *Escherichia coli* y *Pseudomonas aeruginosa*) para evaluar su efecto insecticida. Los resultados han mostrado que todas las GroEL analizadas presentan actividad insecticida; sin embargo, no todas ejercen la misma letalidad.

Por ejemplo, la GroEL de *Alcaligenes faecalis* posee una actividad muy baja (30%), sobre todo si la comparamos con la proteína aislada de *Xenorhabdus nematophila*, la cual puede matar, en menos de 48 horas, al 100% de las larvas probadas. Para corroborar que estas GroEL puedan ser consideradas pro-



teínas multifuncionales, es necesario demostrar que conservan su actividad de chaperona; es decir, que ayudan a la estructura de otras proteínas. Para esto, mediante pruebas de replegamiento de la enzima lactato deshidrogenasa, demostramos que todas las GroEL anteriormente mencionadas conservan la actividad chaperona, por lo que se pueden considerar proteínas multifuncionales.

Lo anterior nos da la pauta para preguntarnos: ¿qué hace que una GroEL sea más letal que otra? ¿Le proporciona esto ventajas evolutivas a los organismos? ¿Son las relaciones simbióticas las causantes del fenómeno *moonlighting*? ¿El mecanismo de actividad es similar al presentado por otras toxinas? Esto lo estamos respondiendo mediante el análisis y la comparación de las secuencias de ADN y aminoácidos, así como de la estructura tridimensional de las proteínas; de este modo, podremos mapear los pequeños o grandes cambios que permitan entender cómo estas proteínas ejercen su actividad alternativa, y cómo fue adquirida, para así contribuir al conocimiento del interesante mundo de las proteínas multifuncionales.

Al final, al igual que Utterson, quien con pequeñas pistas fue resolviendo el enigma en torno a Jekyll y Hyde, la contribución al conocimiento sobre la estructura y función de estas proteínas podría ayudar a responder las preguntas existentes y, así, develar el fascinante misterio que existe respecto a su personalidad múltiple.

Abraham Omar Rivera Ramírez

Laboratorio de Estudios Ecogenómicos.
Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
abraham.rivera@uaem.mx

Blanca Inés García Gómez

Instituto de Biotecnología.
Universidad Nacional Autónoma de México.
blanca.garcia@ibt.unam.mx



Édgar Dantán González

Laboratorio de Estudios Ecogenómicos.
Universidad Autónoma del Estado de Morelos.
edantan@uaem.mx

Referencias específicas

- Basilion, J. P., T. A. Rouault, C. M. Massinople, R. D. Klausner y W. H. Burgess (1994), "The iron-responsive element-binding protein: localization of the RNA-binding site to the aconitase active-site cleft", *Proc Natl Acad Sci*, 91(2):574-578.
- Chaput, M., V. Claes, D. Portetelle, I. Cludts, A. Cravador, A. Burny, H. Gras y A. Tartar (1988), "The neurotrophic factor neuroleukin is 90% homologous with phosphohexose isomerase", *Nature*, 332:454-455.
- Henderson, B., M. A. Fares y P. A. Lund (2013), "Chaperonin 60: a paradoxically, evolutionarily conserved protein family with multiple moonlighting functions", *Biol Rev*, 88:955-987.
- Jagadeesan, B., O. K. Koo, K. P. Kim, K. M. Burkholder, K. K. Mishra, A. Aroonannual y A. K. Bhunia (2010), "LAP, an alcohol acetaldehyde dehydrogenase enzyme in *Listeria*, promotes bacterial adhesion to enterocyte-like Caco-2 cells only in pathogenic species", *Microbiology*, 156(9):2782-2795.
- Jeffery, C. J. (2014), "An introduction to moonlighting protein", *Biochem Soc Trans*, 42:1679-1683.
- Jeffery, C. J. (2017), "Protein moonlighting: what is it, and why is it important?", *Phil Trans R Soc*, 373: 20160523.
- Kim, J. W. y C. V. Dang (2005), "Multifaceted roles of glycolytic enzymes", *Trends Biochem Sci*, 30:42-150.
- Kumari, P, S. Kant, S. Zaman, G. K. Mahapatro, N. Banerjee y N. B. Sarin (2013), "A novel insecticidal GroEL protein from *Xenorhabdus nematophila* confers insect resistance in tobacco", *Transgenic Res*, 23: 99-107.
- Mark, D. F y C. C. Richardson (1976), "Escherichia coli thioredoxin: s subunit of bacteriophage T7 DNA polymerase", *Proc Natl Acad Sci*, 73(3):780-784.
- Pardo-López, L., M. Soberón y A. Bravo (2013), "*Bacillus thuringiensis* insecticidal 3-domain Cry toxins: mode of action, insect resistance and consequences for crop protection", *FEMS Microbiol Rev*, 37:3-22.
- Yoshida, N., K. Oeda, E. Watanabe, T. Mikami, Y. Fukita, K. Nishimura, K. Komai y K. Matsuda (2001), "Protein function: chaperonin turned insect toxin", *Nature*, 411:44.
- Xu, W., K. Seiter, E. Feldman, T. Ahmed y J. W. Chiao (1996), "The differentiation and maturation mediator for human myeloid leukemia cells shares homology with neuroleukin or phosphoglucose isomerase", *Blood*, 87:4502-4506.

Noemí Hernández Neri, Claudia Gutiérrez Antonio y Juan Fernando García Trejo

Diseño de biocombustibles sólidos para un desarrollo sustentable

El uso de herramientas de simulación de procesos para la producción de biocombustibles sólidos permite analizar diferentes condiciones de procesamiento y seleccionar aquellas con alto rendimiento, costos de operación reducidos y un bajo impacto ambiental. México tiene un gran potencial en este ámbito para explorar alternativas de obtención de biocombustibles sólidos a partir de la biomasa.

Biocombustibles sólidos

Dada la tasa de crecimiento de la población mundial, cada vez con un mayor nivel de vida, se necesitará más y más energía para abastecer a los hogares, industrias y medios de transporte. En los últimos años, la **bioenergía** ha recibido un gran interés debido a que puede contribuir de manera importante a sustituir las fuentes fósiles de energía sin provocar un incremento en las emisiones de dióxido de carbono; además, permite la conversión de la biomasa, en especial de los desechos orgánicos rurales y urbanos, para su aprovechamiento energético (Islas y Martínez, 2010). En este sentido, la mitigación del problema del cambio climático es posible si la bioenergía participa significativamente en el suministro de energía en el mediano y largo plazo.

Los biocombustibles son un tipo de bioenergía (Islas y Martínez, 2010), definidos como combustibles producidos mediante la transformación de la biomasa y que pueden obtenerse en estado sólido, líquido y gaseoso. En la actualidad, representan una fuente potencial de energía renovable que gradualmente ayudará a eliminar la dependencia energética de las fuentes fósiles. Asimismo, conforme lo permitan los procesos productivos y las políticas gubernamentales, podrán abaratar el precio de la energía en todo el mundo.

En particular, el estudio de los biocombustibles sólidos es importante debido a que pueden utilizarse para generar energía eléctrica o calorífica, así como para producir otros biocombustibles. Los biocombustibles sólidos son aquellos carburantes compuestos por biomasa sometida a un proceso de conversión

Bioenergía

Energía renovable producida a partir de la biomasa, la cual incluye material orgánico, como los árboles, las plantas y los materiales de desecho.



como el astillado, la trituración y la compactación, para mejorar sus propiedades físicas y químicas; por ejemplo, es posible aumentar su poder calorífico por unidad de masa, lo cual representa una característica destacable para su comercialización.

México tiene un alto potencial para la producción de biocombustibles sólidos; sin embargo, las acciones para promover el uso de tecnologías modernas en el sistema energético nacional son hasta ahora insuficientes, debido a que actualmente no hay políticas o programas específicos que fomenten el uso de los biocombustibles sólidos en los sectores industrial y comercial (García y Masera, 2016). Aunado a lo anterior, también es importante superar los desafíos en la producción de los biocombustibles sólidos, tales como la optimización de métodos y procesos para reducir los costos, así como minimizar el impacto ambiental.

Los objetivos anteriormente mencionados pueden alcanzarse mediante el uso de tecnologías como la simulación de procesos, la cual es una herramienta de vital importancia para impulsar el desarrollo sostenible en México. La simulación, según Shannon (1975), es el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y realizar experimentos con este modelo, ya sea para comprender el comportamiento del sistema o para evaluar varias estrategias que mejoren su funcionamiento; es decir, la simulación imita el comportamiento de un sistema por medio de un modelo que representa la realidad.

En particular, en el ámbito de la producción, la simulación de procesos permite predecir el comportamiento de un proceso de transformación, lo cual posibilita resolver problemas del mundo real de una manera segura y eficiente. Así, el modelo propuesto proporciona la información necesaria para realizar un análisis que se puede verificar, comunicar y comprender fácilmente. Otra ventaja importante de la simulación de procesos es que reduce la necesidad de mano de obra, el tiempo invertido para realizar una investigación experimental, así como los materiales o recursos a utilizar, con lo cual disminuye el impacto ambiental en el proceso.

En todas las industrias y disciplinas, la simulación de procesos proporciona soluciones valiosas porque

facilita una visión clara de los sistemas complejos. A menudo, las simulaciones se utilizan cuando resulta imposible o poco práctico hacer experimentos en un sistema real, ya que las simulaciones se consideran de bajo riesgo. Esto ha ganado importancia en los últimos años porque se pueden utilizar para estudiar y comparar diseños alternativos, para solucionar problemas existentes, o bien para analizar el comportamiento de un nuevo sistema incluso antes de que se complete el prototipo, lo cual reduce costos y plazos de entrega. Con la simulación, se puede mejorar el diseño de futuras plantas de procesamiento, o bien aumentar el rendimiento de las ya existentes.

Considerando lo anterior, el objetivo de este trabajo es explorar el uso de la simulación de procesos para la obtención de biocombustibles sólidos. En primer lugar, se brindará información acerca de los simuladores y sus tipos, con especial énfasis en los simuladores de procesos; también se presentarán los diferentes simuladores de procesos disponibles en el mercado, incluido el *software* Aspen Plus, el cual se considera el más confiable por sus capacidades para hacer un análisis completo de los procesos de producción de biocombustibles sólidos. Posteriormente, se darán algunos ejemplos de los trabajos que se han reportado en torno al modelado de la producción de biocombustibles sólidos en *pellets* y, por último, se expondrán las perspectivas del uso de esta herramienta en México.

■ ■ ■ Simuladores de procesos

■ Un simulador es una herramienta que permite imitar situaciones reales mediante la elaboración de un modelo, el cual se emplea para analizar los efectos de realizar modificaciones de algunas condiciones, con el fin de construir conocimiento a partir de la experiencia. Es decir, los simuladores de procesos permiten responder a la pregunta “¿qué pasa si...?”. Por ejemplo, en los simuladores de manejo de un automóvil, que se emplean en algunos estados de México para obtener la licencia de conducir, se replican situaciones reales, como el paso de peatones, el funcionamiento de los semáforos e incluso condiciones de lluvia, con el objetivo de valorar las habilidades

de la persona que conduce el auto, así como su conocimiento y respeto de los reglamentos de tránsito vigentes, para determinar si procede o no la emisión de una licencia de manejo.

Existen dos tipos de simuladores: unos utilizados como instrumento de ocio y entretenimiento, por lo general, en videojuegos, y otros que se emplean en el ámbito profesional para la capacitación y el desarrollo de proyectos en diversas ramas del conocimiento. En el segundo tipo están los simuladores en materia educativa, usados por estudiantes que desean adquirir destrezas para enfrentarse a problemas matemáticos, físicos, entre otros; también se encuentran los simuladores clínicos, que permiten la evaluación de pacientes virtuales; además, existen los simuladores de negocios, que son un importante instrumento para la toma de decisiones y el desarrollo de actividades gerenciales en las diferentes actividades de una empresa. Algunos otros usos de los simuladores incluyen el análisis del impacto ambiental por diversas fuentes, el diseño de sistemas de comunicaciones y de transporte, la mejora de los sistemas de manufactura o procesos de producción, entre otros. En particular, en el sector industrial, la simulación de procesos es una herramienta que se ha popularizado y vuelto indispensable, ya que permite analizar los procesos de producción que se encuentran en fase de evaluación inicial (para decidir si se construyen o no), en fase de operación (para conocer su funcionamiento), o bien en fase de mejora (para evaluar el beneficio de realizar modificaciones en el proceso).

Los simuladores de procesos son un conjunto de programas tecnológicos que permiten el modelado de un proceso de producción. Para ello, debe defi-

nirse un proceso de producción como una serie de transformaciones que se realizan a una materia prima para obtener un producto. Esas operaciones se realizan en diferentes equipos, en los cuales se llevan a cabo procesos de acondicionamiento (calentar, enfriar, aumentar la presión o disminuirla), de conversión (reacciones químicas), así como de separación (para obtener con alta pureza los productos de interés). Por ello, los simuladores de procesos constan de distintos módulos para cada uno de los equipos y los tipos de procesamiento que deben realizarse a las materias primas; así, se incluyen bancos de datos que contienen información de las propiedades físicas y químicas de los compuestos, modelos de dichas propiedades, cálculos de equipos y análisis de costos, por lo que permiten simular una amplia variedad de procesos. Debido a que los simuladores son herramientas confiables, muchas veces se prefieren para así evitar la realización de experimentos y optimizar los recursos necesarios. Entre los simuladores más usados en la industria, la investigación y la enseñanza, se encuentran: HYSYS, Chemcad, Pro II, Super-Pro Designer y Aspen Plus. Este último, además de las bases de datos, incluye módulos o programas para representar el procesamiento de las materias primas (véase la Figura 1).

■ Procesos de producción de biocombustibles sólidos

■ Existen diferentes tipos de biocombustibles sólidos, tales como las astillas, briquetas, pacas y *pellets*. En el presente trabajo nos enfocamos en los *pellets*, pequeños cilindros que resultan de la densificación de la biomasa, la cual no es uniforme. Por ello, la

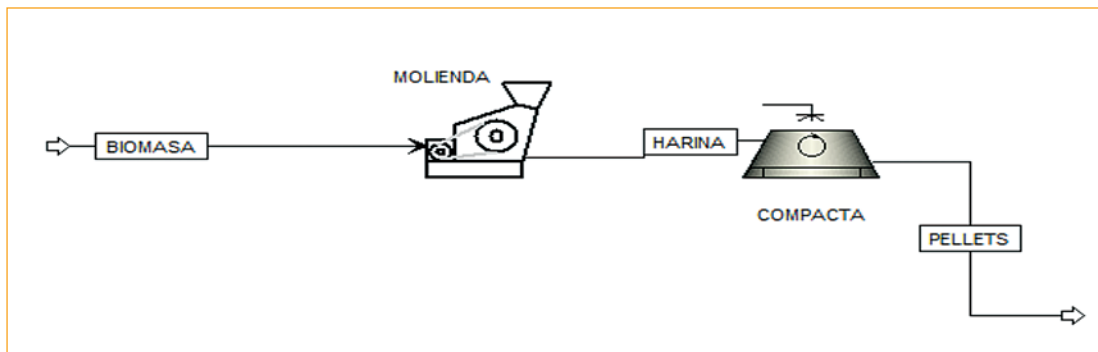


Figura 1. Diagrama de flujo para un proceso de pelletizado a partir de biomasa en el software Aspen Plus.

norma ISO 17725 (ISO, 2014) busca establecer especificaciones y clases para la comercialización de los biocombustibles sólidos que se originen de actividades de silvicultura, agricultura, horticultura y acuicultura; el objetivo es estandarizar las propiedades de calidad, como el poder calorífico, el cual depende del contenido de humedad de la biomasa, por lo que es importante determinar las condiciones ideales para realizar la compactación.

El proceso de producción de los *pellets* incluye operaciones de secado, trituración, densificación (o pelletizado) y clasificación por tamaño (véase la Figura 2). Es muy importante analizar el efecto que cada una de estas operaciones provoca sobre el rendimiento del proceso, el poder calorífico de los *pellets* y el consumo de energía. Las variables que pueden manipularse incluyen: la humedad de la biomasa antes de la densificación, el tamaño de las partículas resultantes de la trituración, así como la presión y temperatura de la compactación. La búsqueda de las variables ideales para la obtención de los *pellets* conlleva muchos experimentos, gastos en reactivos, empleo extenso de tiempo para el análisis, o bien riesgos potenciales en cada etapa; por ello, la simulación de procesos facilita el objetivo.

■ **Simulación de procesos de producción de biocombustibles sólidos**

En general, la simulación de un proceso de producción de biocombustibles sólidos requiere de información sobre el tamaño de las partículas de la biomasa, el contenido de humedad, así como la composición de las materias primas. Como se mencionó, estas variables influyen en el poder calorífico, por lo que es importante modelar correctamente el procesamiento de la biomasa. El uso de simuladores como Aspen Plus permite evaluar el efecto del tamaño de la partícula, por ejemplo, en el poder calorífico del *pellet*, así como en el consumo de energía del proceso. Esta información es valiosa para determinar si algún cambio afectará o no de manera significativa la calidad del producto, o bien el consumo de energía. Así, se puede analizar el costo-beneficio de manera previa a la implementación. Por ello, se reportan



Figura 2. Proceso de pelletizado.

muchos estudios en los que se emplea la simulación de procesos para analizar la producción de biocombustibles sólidos.

Por ejemplo, en Portugal, se propuso un modelo de simulación del proceso de combustión de biomasa que incluye la separación de sólidos y el secado del tallo de arroz, la cual fue la biomasa empleada en el estudio (Patrocínio, 2017); el modelo propuesto permitirá simular la operación en una planta de *pellets* para diferentes fuentes de biomasa y condiciones de operación. Otro estudio, en Canadá, evaluó técnica y económicamente la producción de *pellets* basados en residuos forestales, paja de trigo y pasto de hierba, para estimar los costos de producción de *pellets* y el tamaño óptimo de la planta de producción. En este caso, el modelo del proceso desarrollado en Aspen Plus fue útil para predecir el consumo de energía en

cada operación de la producción de *pellets*, lo que permitió generar estrategias para lograr el máximo aprovechamiento energético durante su procesamiento (Shahrukh, 2015). Por otra parte, en Argentina, se presentó un modelo de simulación para evaluar el rendimiento en términos económicos y de producción en una planta pelletizadora a partir de madera; con este modelo se analizaron algunos procesos, como molienda en húmedo, secado de materia prima, pelletizado, enfriado y empaclado. Este tipo de estudios permite evaluar la factibilidad económica, así como el rendimiento teórico, de la optimización del proceso de producción (Aqueri y cols., 2013).

En cambio, en México, el tema de la simulación de procesos para la obtención de biocombustibles sólidos no se ha desarrollado completamente. No obstante, el uso de esta herramienta es muy importan-





te para afrontar los principales desafíos que surgen al diseñar o mejorar los procesos de producción de biocombustibles sólidos. Aunado a ello, nuestro país produce una gran cantidad de biomasa, por lo que el impulso e integración de la cadena de aprovechamiento de este tipo de residuos es de vital importancia para el desarrollo sostenible. Los residuos agrícolas primarios, secundarios y agropecuarios tienen el potencial energético más elevado (IEA, 2015), y las estimaciones sugieren que esto aumentará en los próximos años (Rios y Kaltschmitt, 2013). Con base en los recursos potenciales de bioenergía de las actividades agrícolas en México, se estima que se produjeron 75.7 millones de toneladas de biomasa seca de 20 cultivos diferentes (Guo y cols., 2015); las principales fuentes de residuos de cultivos fueron el rastrojo de sorgo, residuos de maíz (rastrojo y mazorcas de maíz), paja de trigo, bagazo de caña de azúcar, bagazo de agave, pulpa de café y residuos de cítricos (obtenidos de fábricas de zumos y conservas de frutas). También otros residuos tienen el potencial de ser utilizados como materia prima para la producción de *pellets*, tales como aquellos de la poda de aguacate, mango, nueces, manzana, melocotón, uva, guayaba y ciruela.

Por lo anteriormente expuesto, la pelletización es un proceso que potencialmente permite aprovechar los residuos que hoy no se usan en la industria agrícola y forestal en México. No obstante, el proceso tiene asociados retos importantes, como la reducción de los costos de instalación de los equipos de producción, el transporte a plantas procesadoras, la disminución de la volatilidad del mercado de los *pellets* mediante el aseguramiento anticipado de la materia prima para estabilizar el suministro de los biocombustibles sólidos, la generación de confianza entre los consumidores, así como la mejora de la eficiencia energética de las tecnologías de producción y uso de estos biocombustibles sólidos (Sjoding y cols., 2013). Por lo tanto, es necesario implementar tecnologías más eficientes, desarrollar nuevas opciones tecnológicas y evaluar métodos alternativos que aseguren la producción y el uso sustentable de los *pellets*; en este sentido, la simulación de procesos permite hacer frente a los retos anteriormente mencionados.

■ Conclusiones

■ Los biocombustibles son uno de los tipos de bioenergía con mayor demanda y cuyo proceso puede ser diseñado o mejorado mediante el uso de herramientas de simulación que permiten realizar análisis de sensibilidad para diferentes variables del proceso, explorar soluciones alternativas y seleccionar aquellas con menores costos de materiales y de energía, para asegurar un buen rendimiento del proceso y la adecuada calidad del producto.

Agradecemos el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología para el proyecto 279753. Asimismo, Noemí Hernández Neri recibió una beca de Conacyt para sus estudios de posgrado.

Noemí Hernández Neri

Universidad Autónoma de Querétaro.
noemi_hne@hotmail.com

Claudia Gutiérrez Antonio

Universidad Autónoma de Querétaro.
claugtez@gmail.com

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.
juanfernando77@gmail.com



Lecturas recomendadas

- Aqueri, G., O. Horacio y P. L. Laneri (2013), *Planta de elaboración de pellets maderera: simulación y análisis proceso productivo* (tesis de doctorado), Universidad Argentina de la Empresa, Buenos Aires. Disponible en: <<https://repositorio.uade.edu.ar/xmlui/handle/123456789/3970>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- García Bustamante, C. A. y O. Maser Cerutti (2016), *Estado del arte de la bioenergía en México*, Guadalajara, Imagia Comunicación.
- Guo, M., W. Song y J. Buhain (2015), "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:712-725.
- IEA (2015), "Sustainable international bioenergy trade: securing supply and demand", *IEA Bioenergy Task 40 on Sustainable International Bioenergy Trade*. Disponible en: <<https://www.bioenergytrade.org/wp-content/uploads/sites/17/2013/09/iea-task-40-country-report-2014-us.pdf>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Islas Sampeiro, J. y A. Martínez Jiménez (2010), "Bioenergía", *Ciencia*, 61(2):30-39.
- ISO (2014), "ISO 17225-6:2014. Solid biofuels – Fuel specifications and classes. Part 6: Graded non-woody pellets", *International Organization for Standardization*. Disponible en: <<https://www.iso.org/standard/59461.html>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Patrocínio, F. (2017), *Aspen simulation of biomass conversion processes*, Lisboa, Instituto Superior Técnico. Disponible en: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/1689244997258394/Resumo_Alargado_67971.pdf>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Rios, M. y M. Kaltschmitt (2013), "Bioenergy potential in Mexico—status and perspectives on a high spatial distribution", *Biomass Conversion and Biorefinery*, 3(3):239-254.
- Shahrukh, S. M. (2015), *Energy Return on Investment and Techno-economics of Pellet Production from Steam Pretreated Biomass* (tesis de maestría), University of Alberta, Edmonton. Disponible en: <<https://era.library.ualberta.ca/items/1c380fbc-bf17-4189-bd37-baca6a9eddef>>, consultado el 27 de octubre de 2021.
- Shannon, R. E. (1975), *System Simulation - The Art and Science*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall.
- Sjoding D., E. Kanoa y P. Jensen (2013), *Developing a wood pellet/densified biomass industry in Washington State: opportunities and challenges*, Olympia, Washington State University Energy Program. Disponible en: <<https://www.msuxextension.org/forestry/WB2E/Pellets/Densified%20Biomass%20Report.pdf>>, consultado el 16 de diciembre de 2016.

José Luis Álvarez García

Galileo y Kepler

(parte I)

Galileo Galilei y Johannes Kepler, partícipes de la revolución científica, dueños de personalidades disímbolas y contrastantes, jamás se conocieron personalmente, pero juntos protagonizaron algunos episodios muy interesantes mientras sus vidas y obras se desarrollaban paralelamente en diversos frentes. Aquí se presenta la primera parte de una reseña conjunta de algunos capítulos de sus trayectorias.



Figura 1. Galileo Galilei.

Los inicios

Galileo Galilei nació en Pisa el 5 de febrero de 1564 (véase la Figura 1). Fue el primogénito del matrimonio entre Vincenzo Galilei y Giulia Ammannati, quienes contrajeron nupcias en Florencia el 5 de julio de 1562. Vincenzo era un consumado laudista y teórico musical de la corte del Gran Duque de Toscana, además de dedicarse al comercio de la lana. Giulia –se decía– era descendiente de un cardenal romano.

Johannes Kepler nació en Weil der Stadt el 27 de diciembre de 1571 (véase la Figura 2). También fue el primogénito, siete meses después del matrimonio entre Heinrich Kepler y Katherine Guldenmann. Su padre fue un mercenario que difícilmente pudo escapar de la horca. Su madre era hija de un posadero y fue criada por una tía, que acabó siendo quemada viva por bruja; la propia Katherine fue acusada, en su vejez, de tener tratos con el diablo y escapó de la hoguera con trabajos.

Galileo tuvo una educación muy esmerada. De niño fue internado en la excelente escuela jesuita del Monasterio de Vallombrosa, cercano a Florencia. Los monjes habían puesto especial atención en el joven Galilei, ya que Vincenzo era





Figura 2. Johannes Kepler.

considerado uno de los favoritos de la Gran Duquesa de Toscana, Bianca Capello, esposa del Gran Duque Francisco I; además, los religiosos habían detectado el talento del joven y pensaban que llegaría lejos en la carrera eclesiástica. Sin embargo, cuando Galileo manifestó su deseo de convertirse en sacerdote, Vincenzo fue de inmediato a rescatarlo y lo envió de regreso a Pisa con un pariente para que aprendiera el negocio de las telas. Al mismo tiempo, inició sus estudios de medicina e ingresó a la Universidad de Pisa en el verano de 1581, de acuerdo con los deseos de Vincenzo, quien estaba convencido de que el talento de su hijo merecía más que una carrera de comerciante. Galileo siguió los estudios médicos por poco tiempo y se percató de que no era lo que deseaba; no obstante, descubrió el gusto por las matemáticas y se coló a tomar clases con Ostilio Ricci, un discípulo de Nicolo Tartaglia, algebrista italiano quien, entre otras cosas, había redescubierto la fórmula para la solución general de las ecuaciones de tercer grado. Ricci no tardó en hablar con Vincenzo para convencerlo

de que el joven Galilei se dedicara por completo a las matemáticas, a lo cual el padre accedió.

En contraste con lo anterior, Heinrich Kepler al parecer no estudió ningún oficio, excepto “las armas”, a lo cual se refieren sus posteriores aventuras militares. Johannes tenía cuatro años cuando su madre siguió a su padre a la guerra; cinco, cuando sus padres regresaron y la familia inició su vagabundear por Leongberg. Él pudo acudir a la escuela tan sólo de manera irregular, y desde los nueve hasta los once años no asistió en absoluto, sino que fue puesto a trabajar duramente en el campo. En consecuencia, y pese a su despierta inteligencia, necesitó el doble de tiempo necesario para terminar los tres cursos de la escuela primaria. A los trece años, pudo finalmente ingresar en el seminario teológico de Adelberg.

Los ambientes en los que transcurren las infancias de Galileo y de Kepler son sumamente contrastantes. En el caso de Kepler, al buscar los orígenes de su desarrollo intelectual, aparentemente en condiciones tan adversas, no obstante, se encuentran compensaciones. Las excepcionales facilidades educativas existentes en su país conformaron el marco en el cual se desarrolló la fértil inteligencia del joven Johannes. Los duques de Wurtemberg crearon un moderno sistema educativo para oponerse en la controversia religiosa que se dio en aquella región de Europa; ellos abrazaron el credo luterano y buscaron que éste pudiera ser sostenido por pastores eruditos excepcionalmente preparados. Así, las universidades de Wittenberg y de Tubinga fueron los arsenales intelectuales de la nueva creencia protestante. Los monasterios y conventos que fueron confiscados a Roma proporcionaron un conjunto de escuelas elementales y secundarias que formaban la estructura ideal que alimentaba las universidades y las cancellerías con jóvenes brillantes. Existía un sistema de subvenciones y becas para los hijos de los pobres que fueran fieles devotos, con lo cual se garantizaba una eficiente selección de los candidatos. En este contexto, la precoz inteligencia de Kepler garantizó automáticamente su paso de la escuela al seminario y de éste a la universidad; además, su mala salud y su interés por la religión señalaban hacia la carrera religiosa como la obvia elección.

■ Experiencias universitarias

■ El primer trabajo de Galileo como profesor universitario fue en la Universidad de Pisa; en el verano de 1589 lo contrataron por tres años (véase la Figura 3). Tal y como señala Arthur Koestler, refiriéndose a su personalidad, Galileo presentó desde muy pronto “esa fría y sarcástica presunción que siempre tuvo a mano para crearse dificultades durante toda su vida”. No tardó en sentir desprecio por los tradicionales y presuntuosos profesores de esa universidad, vestía de manera desaliñada en vez de utilizar la obligatoria toga de profesor y les decía a sus alumnos: “Si usas toga, tienes que cumplir con ciertas normas. Por ejemplo, no puedes ir a un prostíbulo porque la dignidad del traje te lo impide”.

Sus colegas consideraban que ese comportamiento era grosero e inaceptable y buscaron la forma de deshacerse de él. Galileo llegó a exagerar en su desprecio y expuso sus opiniones ante un auditorio repleto de bulliciosos estudiantes:

Los hombres son como botellas de vino –dijo–. Id a una taberna. Mirad las botellas antes de beber vino tinto. Algunas no tienen muchos adornos. Están cubiertas de polvo, sin etiquetas [...] pero contienen un vino de tal calidad que la gente lo pone por las nubes extasiada, proclamándolo glorioso y divino. Mirad luego las botellas que tienen etiquetas preciosas. Cuando probáis su contenido, veis que están llenas de aire, de perfume o de colorete. ¡Sólo sirven para mear en ellas!

Fue totalmente explicable la respuesta de las autoridades universitarias, quienes no le renovaron el contrato de tres años.

Por su parte, Kepler se graduó a los veinte años en la Facultad de Artes de la Universidad de Tubinga (véase la Figura 4). Luego se matriculó en la Facultad de Teología con la idea de proseguir la carrera eclesiástica. Estuvo allí cerca de cuatro años, pero antes del examen final le ofrecieron, sorprendentemente, el puesto de profesor de matemáticas y astronomía en Gratz, capital de la provincia de Estiria. Esta región estaba gobernada por un príncipe católico de los Habsburgo, aunque sus Estados eran predomi-



Figura 3. Pisa.

nantemente protestantes. Por lo tanto, Gratz tenía una universidad católica y una escuela protestante. En 1593, cuando el profesor de matemáticas de esta última falleció, las autoridades pidieron a la universidad protestante de Tubinga que propusiera un candidato. La junta directiva de Tubinga recomendó a Kepler; por un lado, era el mejor estudiante de matemáticas de la universidad y, al mismo tiempo, les resultaba incómodo el joven inteligente e independiente que en alguna ocasión había defendido públicamente la cosmología de Copérnico. Después de algunas dudas, Kepler accedió con la condición de que le permitieran continuar sus estudios de teología



Figura 4. Universidad de Tubinga.

posteriormente, aunque esto último jamás ocurrió. El nuevo profesor de astronomía y matemáticas llegó a Gratz en abril de 1594, a la edad de veintitrés.

■ Galileo en la República de Venecia

■ Después de trabajar en Pisa, y al no haber podido renovar su contrato en la universidad, Galileo se trasladó en 1592 a la República de Venecia para intentar obtener la plaza de profesor de matemáticas de la Universidad de Padua, un puesto que había quedado vacante y llevaba ya cuatro años sin ser ocupado. Galileo preparó un plan y obtuvo la plaza deseada. Además, en la República de Venecia se sintió a sus anchas; contaba con veintiocho años y probablemente fue la época más feliz de su vida. Amante de los vinos y la buena mesa, disfrutaba las reuniones en las villas de Pinelli y de Sagredo. A este último lo inmortalizaría como uno de los personajes de los diálogos que escribiría más adelante. Fue en una de sus múltiples noches de placer cuando Galileo conoció a Marina Gamba; se enamoraron, nunca se casaron y jamás vivieron juntos, mas su relación duró diez años y de ella nacieron tres descendientes: Virginia, Livia Antonia y Vincenzo.

En la segunda mitad del año 1609, Galileo construyó un telescopio que él mismo perfeccionó y se lo regaló al gobierno de la República de Venecia (véase la Figura 5). El aparato ya había sido inventado unos pocos años antes de manera casual en Holanda al combinar pares de lentes; incluso los telescopios con pocos aumentos ya se vendían como juguetes en París. El gobierno veneciano se dio cuenta de la enorme utilidad del instrumento y en pago le duplicó el salario a Galileo como profesor de matemáticas en la Universidad de Padua, el puesto se convirtió en vitalicio y lo llenaron de honores. A finales de 1609 y principios de 1610, Galileo dirigió su telescopio al cielo, algo que parecía sin sentido, incluso blasfemo, pues no debían buscarse cambios en los cielos —conforme a la ortodoxia aristotélica—. De esta manera, Galileo convierte al telescopio en un instrumento de investigación científica y descubre maravillas jamás vistas por ningún otro ser humano. Esto lo coloca, junto con Johannes Kepler y Tycho

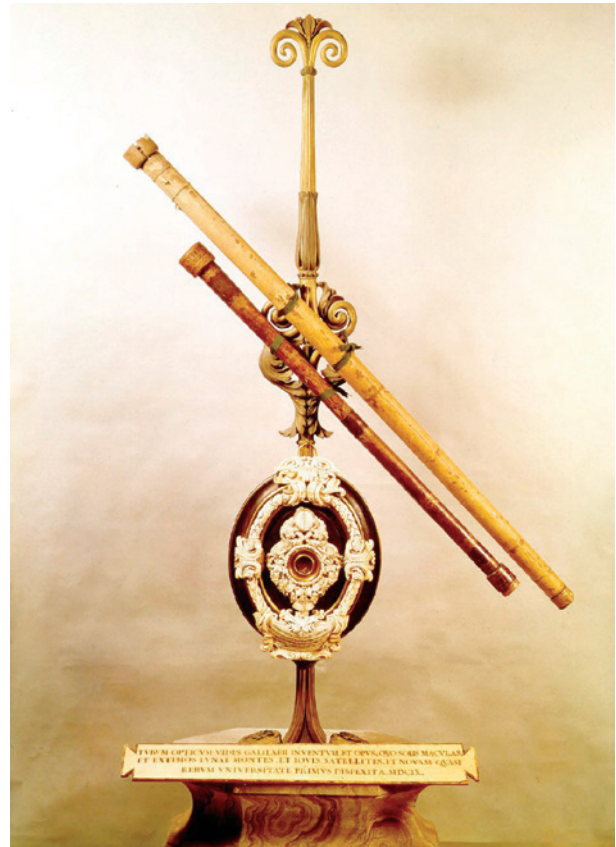


Figura 5. Telescopio de Galileo.

Brahe, como uno de los fundadores de la astronomía moderna. Todo lo que descubrió lo publicó en un pequeño libro titulado *Sidereus Nuncius* (*El mensajero de los astros*), que fue un auténtico éxito y una de las obras más famosas del siglo XVII (véase la Figura 6).

Parecía que Galileo podía tener todo lo que deseaba en la vida, pero no era así. Se sentía prisionero en Venecia y deseaba regresar a la Toscana. De esta manera, inició negociaciones en secreto con Belisario Vinta, secretario de Estado del Gran Duque Cosme II, para volver a Florencia. El 10 de julio de 1610, se anunciaba oficialmente el nombramiento de Galileo Galilei como filósofo y matemático del Gran Duque de Toscana.

■ Kepler en Gratz

■ Iniciado en la cosmología copernicana por su maestro Michael Mestlin, profesor de astronomía y matemáticas de la Universidad de Tubinga, Kepler había aceptado que el Sol podía estar en el centro del uni-

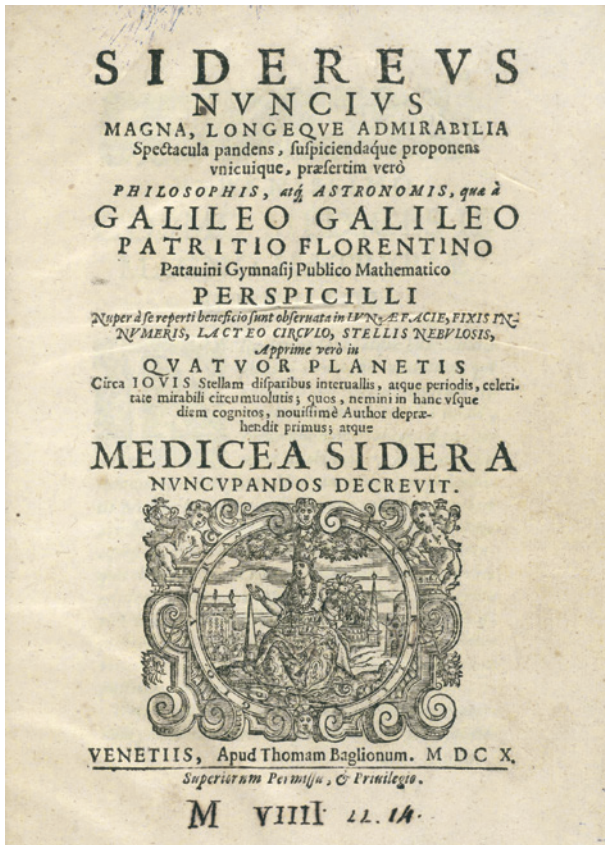


Figura 6. Portada del *Sidereus Nuncius*.

verso por cuestiones meramente metafísicas y se empezó a preguntar por qué sólo había seis planetas y no veinte o un centenar; así también se preguntaba el porqué de los valores particulares de las velocidades de los planetas en sus órbitas y las relaciones entre las dimensiones de éstas. De esta manera, con Kepler reaparece el sueño pitagórico de encontrar regularidades matemáticas en la naturaleza.

Transcurrido un año de su llegada a Gratz, exactamente el 9 de julio de 1595 –fecha registrada cuidadosamente por Kepler–, estaba frente a sus alumnos dibujando una figura en la pizarra cuando le vino repentinamente una idea, con una fuerza tal que creyó que tenía la llave del secreto de la Creación en la mano: “El deleite que extraje de mi descubrimiento –escribiría más tarde– es algo que jamás será capaz de describir con palabras”. Este descubrimiento determinó el curso de su vida, y fue su principal inspiración a lo largo de los años.

La idea era que el universo está construido en torno a ciertas figuras simétricas (triángulo, cuadrado,

pentágono, etcétera) que forman su esqueleto invisible. Al principio Kepler intentó poner a prueba su idea con figuras en dos dimensiones... fracasó. Pero luego pensó en figuras tridimensionales, “¡y he aquí, querido lector, que ahora tienes mi descubrimiento en tus manos...!”.

En términos generales, su modelo es el siguiente: es posible construir tantos polígonos regulares como se desee en dos dimensiones, pero sólo se pueden construir cinco sólidos regulares en un espacio de tres dimensiones. Esos “sólidos perfectos” o “pitagóricos”, en los que todas las caras son iguales, son: el tetraedro, el cubo, el octaedro, el dodecaedro y el icosaedro; Euclides había demostrado que sólo pueden ser construidos estos cinco sólidos. En aquel entonces únicamente se conocían seis planetas (Mercurio, Venus, Tierra, Marte, Júpiter y Saturno) entre cuyos espacios –pensó Kepler– se podrían insertar los cinco sólidos pitagóricos. Era sumamente difícil creer que esto fuera producto del azar y no de la disposición divina. Su idea proporcionaba la respuesta de por qué sólo había seis planetas y permitía comprender también el porqué de las distancias entre las órbitas planetarias; éstas debían estar dispuestas de tal manera que los cinco sólidos pudieran encajar perfectamente dentro de ellas. No obstante, era una idea completamente errónea, pero condujo finalmente a las leyes de Kepler, a la demolición de la antigua concepción del universo y al nacimiento de la astronomía moderna. Esta idea se encuentra expuesta en el primer libro de Kepler, el *Mysterium Cosmographicum*, que terminó de escribir en 1596 (véase la Figura 7).

Kepler, guiado por su falsa idea de que los sólidos perfectos constituían la estructura del universo, necesitaba datos precisos para corroborarla. El único que poseía dichos datos era Tycho Brahe. El 4 de febrero de 1600 ambos se encontraron en el castillo de Benatek, cerca de Praga. El astrónomo danés le encomendó a Kepler el estudio de la órbita de Marte. Fue una afortunada coincidencia en la historia de la ciencia, pues Marte –ahora se sabe– tiene la órbita más excéntrica de todos los planetas entonces conocidos. La órbita de Marte no concordaba con los dogmas astronómicos tradicionales: movimiento

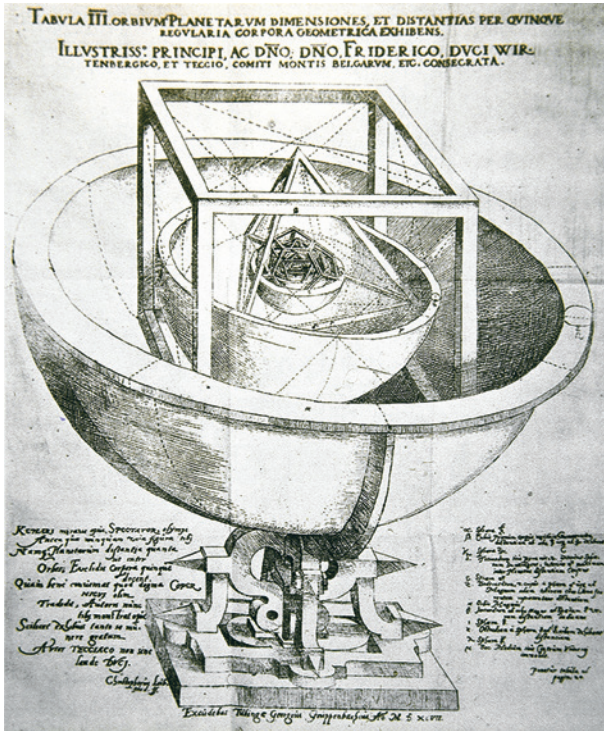


Figura 7. *Mysterium Cosmographicum*.

circular y uniforme. Kepler alardeó y dijo que resolvería el problema en ocho días... fueron casi ocho años. Pero de esta lucha con el planeta rojo emergió la nueva concepción del universo, que aparece en su *Astronomia Nova*, publicada en 1609. Esta obra contiene las dos primeras de sus tres leyes (véase la Figura 8). La tercera ley aparece en su libro *Harmonice Mundi*, terminado en 1618 y en el que continúa presente la obsesión de los sólidos perfectos como la estructura invisible del universo.

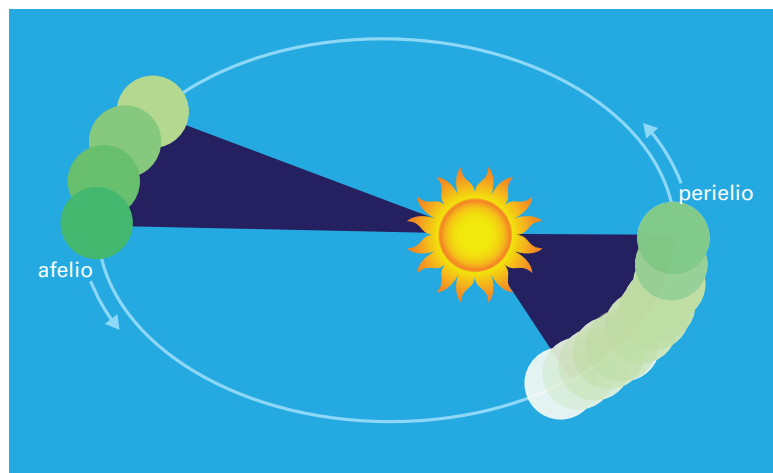


Figura 8. Leyes de Kepler.

■ ■ ■ Cruce de caminos

En términos generales, la revolución científica de los siglos XVI y XVII fue una batalla en el campo del pensamiento humano que se dio en dos frentes. Uno fue en la cosmología y el otro fue en el terreno de la física; y no pudo haber ocurrido ningún cambio en alguno de ellos sin que se produjeran cambios en el otro. Fueron muchos los protagonistas de esta revolución, quienes, al igual que Galileo y Kepler, hicieron sus aportaciones en ambos frentes.

En 1597, Kepler envió a Galileo un ejemplar del *Mysterium Cosmographicum*. El 4 de agosto de ese año Galileo contestó con una carta en la que agradecía el obsequio y manifestaba su fe copernicana. El joven Kepler quedó encantado (tenía siete años menos que Galileo) y volvió a escribirle el 13 de octubre para pedirle algún instrumento que le permitiera medir pequeños desplazamientos de las estrellas fijas, para con eso demostrar el movimiento terrestre. Sin embargo, Kepler no volvería a saber nada del físico italiano durante los siguientes doce años.

Las primeras noticias de los descubrimientos de Galileo con el telescopio llegaron a oídos de Kepler el 15 de marzo de 1610. A principios de abril le llegó un ejemplar del *Sidereus Nuncius* al emperador, quien permitió a Kepler “echarle una ojeada”. Por fin, el 8 de abril Kepler recibió un ejemplar del libro acompañado de una nota donde Galileo le pedía su opinión. Sin embargo, Galileo no le escribió directamente a Kepler, sino que lo hizo por medio del embajador toscano en Praga, Julián de Medici.

Aunque Kepler no se hallaba en condiciones de verificar los discutidos descubrimientos de Galileo, pues no tenía un telescopio, de inmediato dio crédito a todo lo que éste afirmaba en su libro; lo hizo sin ninguna vacilación, e incluso se ofreció para servir públicamente en la batalla como “escudero” o como “asistente” de Galileo... Kepler, el matemático imperial, se ponía al servicio de un estudioso italiano hasta entonces poco conocido fuera de Italia. La carta de contestación de Kepler a Galileo salió de Praga el 19 de abril de 1610. Además, Kepler escribió un folleto titulado *Conversaciones con ‘El mensajero de los astros’*, el cual se imprimió en aquella ciudad durante el mes siguiente. Así, la autoridad de Kepler tuvo un importantísimo papel e hizo que la batalla se decidiera a favor de Galileo en la controversia desatada a raíz de la publicación del *Sidereus Nuncius*, tal y como lo demuestra la correspondencia. En ese tiempo Galileo estaba ansioso por abandonar Padua y ser nombrado matemático de la corte de Cosme de Medici, en cuyo honor nombró “astros mediceos” a los satélites de Júpiter. En la carta dirigida a Vinta, en sus esfuerzos por retornar a la Toscana, Galileo presentó el apoyo de Kepler de manera prominente.

Las amistades de Galileo le aconsejaron que atendiera a Kepler y por fin se dignara a comunicarse con él, después de trece años de su última correspondencia directa. Entonces, el italiano le envió una carta a Kepler el 19 de agosto de 1610, preocupado tal vez ante la posibilidad de perder a su aliado más poderoso. No obstante, en dicha carta Galileo no le comunica ningún descubrimiento realizado con el telescopio, solamente se muestra quejumbroso respecto de “los filósofos ignorantes” que no cesan de atacarlo.

Por otro lado, Galileo había decidido comunicar sus descubrimientos mediante anagramas, celoso por mantener la prioridad de éstos. Enterado de dichos anagramas, y genuinamente interesado en su contenido, Kepler intentó resolverlos y encontró –erróneamente– que Galileo había descubierto dos satélites de Marte, lo cual ocurrió en realidad más de dos siglos después por el astrónomo estadounidense Asaph Hall. Kepler también descifró de manera errónea

que Galileo había descubierto una gran mancha roja en Júpiter, la cual fue observada por Robert Hooke cincuenta años después, así como por Giovanni Casini en 1650.

En el verano de 1610, uno de los mecenas de Kepler, el elector Ernest de Colonia, duque de Baviera, se hallaba entre los privilegiados a quienes Galileo había obsequiado un telescopio. El duque estaba en Praga por asuntos de Estado y prestó por un corto tiempo su telescopio a Kepler. Así, desde el 3 de agosto hasta el 9 de septiembre, Kepler pudo observar las lunas de Júpiter con sus propios ojos. El resultado fue otro corto panfleto, *Informe de las observaciones de los cuatro satélites errantes de Júpiter*, en el cual Kepler confirmaba, esta vez mediante su propia experiencia, los descubrimientos de Galileo. Esto supuso la aparición por primera vez en la historia del término *satélite*, que Kepler había acuñado en una carta previa a Galileo.

Aquí concluye el contacto personal entre Galileo y Kepler. Por segunda vez, Galileo interrumpió la correspondencia entre ambos, aun cuando Kepler mandó varias cartas más. En su obra, Galileo rara vez menciona a su interlocutor y, en general, ignoró los descubrimientos científicos de Kepler, pues defendió hasta el final los movimientos circulares y los epiciclos como las únicas formas de movimiento concebibles en las regiones celestes.

José Luis Álvarez García

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México.

josel.alvarezgarcia@gmail.com

Lecturas recomendadas

- Koestler, A. (1981), *Los sonámbulos*, México, Conacyt.
- Koestler, A. (1987), *Kepler*, Barcelona, Salvat.
- Lear, J. (2005), “Estudio introductorio”, en *El sueño de Kepler*, México, DGDC-UNAM.
- Reston Jr., J. (1996), *Galileo. El genio y el hombre*, Barcelona, Ediciones B.
- Vaquero, J. M. (2003), *La nueva física*, España, Nivola.

Mayra Pamela Becerra Amezcua y Arisaí C. Hernández Sámano

Usos biotecnológicos del pez león

El pez león es una especie con un alto potencial de usos biotecnológicos debido a las diversas propiedades de las sustancias extraídas del veneno que producen estos organismos marinos. La investigación y el avance de las técnicas para descubrir nuevas moléculas son necesarios para desarrollar tratamientos contra el cáncer, estudiar enfermedades neurológicas y proponer aplicaciones en la industria.

Potencial biotecnológico del pez león

P*terois volitans*, mejor conocido como pez león (véase la Figura 1), es una especie marina popular en el gremio de acuaristas; su valor puede llegar hasta los 80 dólares estadounidenses por espécimen, debido a su alta fecundidad y ausencia de depredadores naturales. Esta especie nativa de los arrecifes coralinos de la región Indo-Pacífica fue liberada hace más de 35 años en arrecifes de Florida, lo que provocó una invasión de los ecosistemas en varias regiones del noreste del océano Atlántico, el mar Caribe y Golfo de México (Aguilar-Perera y cols., 2015). Como estrategia de control, se promueve la extracción para el consumo humano, pero el pez león también puede usarse con fines biotecnológicos, mediante un conjunto de técnicas que utilizan organismos vivos o sus derivados para la creación de productos u optimización de procesos con usos específicos. Aunado a esto, el desarrollo tecnológico en el buceo y la prospección marina, junto con el impulso de métodos para el descubrimiento de nuevas moléculas, a partir del trabajo de las ciencias genómicas y **proteómicas**, han beneficiado la búsqueda de productos de origen marino con potencial biotecnológico (Nagle y cols., 2004).

El pez león posee espinas que contienen un veneno con efecto adverso tanto para sus presas como para la salud humana (véase la Figura 2); sin embargo, se ha estudiado que los componentes de esta sustancia presentan actividad antibacteriana, antitumoral y hepatoprotectora, entre otras, lo que significa que este organismo marino tiene un amplio potencial de usos médicos y hasta industriales. En este sentido, la biotecnología azul o biotecnología marina se ha ocupado de la investigación y el aprovechamiento del veneno del pez león para diversos fines.

Proteómica

Disciplina que estudia todas las proteínas de un organismo, tejido o célula.





Figura 1. *Pterois volitans*. Fotografía: Saúl López Vite.

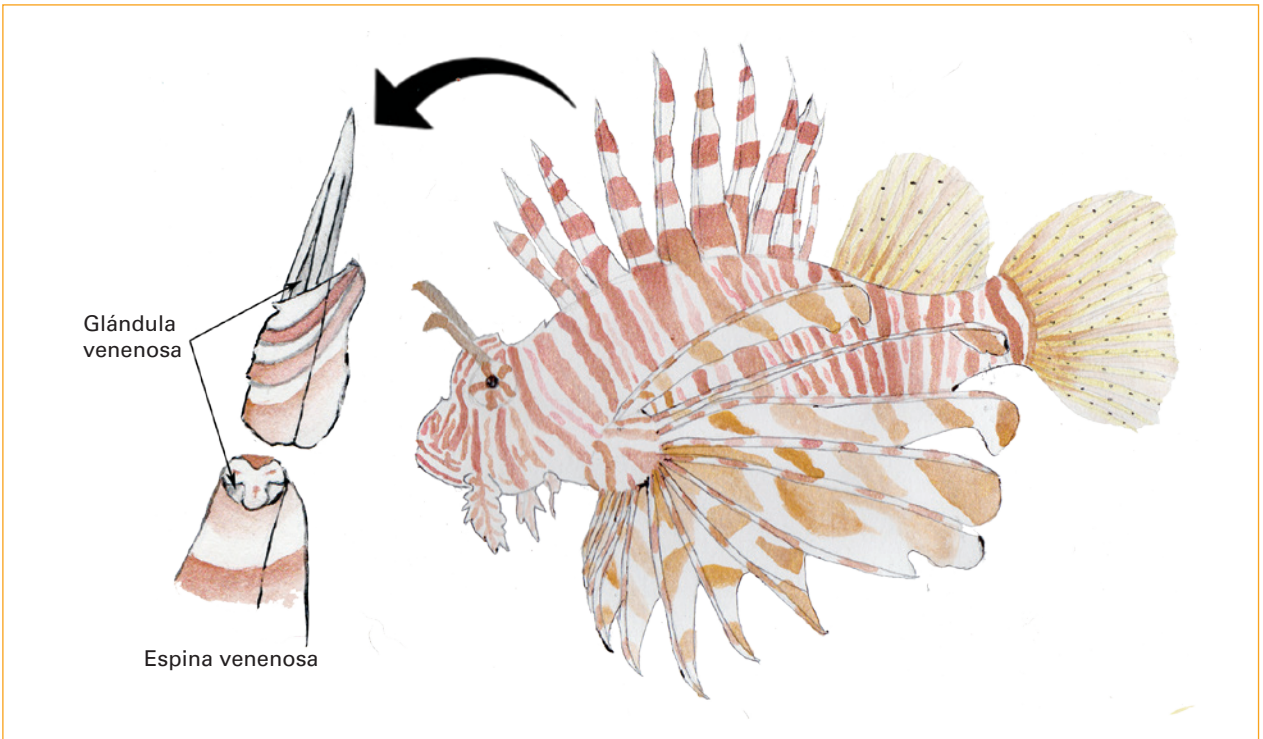


Figura 2. Esquema del pez león y su glándula venenosa. Esquema elaborado por Mayra Pamela Becerra Amezcua.

En general, los venenos de diferentes organismos marinos han demostrado tener un importante potencial en el campo biomédico, debido a que poseen estructuras moleculares únicas que constituyen una fuente de varios fármacos. Los venenos son una mezcla de sustancias químicas de diversa naturaleza: por una parte, los organismos pluricelulares sintetizan proteínas capaces de afectar procesos vitales como la circulación sanguínea o la sinapsis neuronal, entre otros, como método de protección ante los depredadores o con usos alimenticios; por otro lado, las toxinas son sustancias venenosas fabricadas por organismos unicelulares, aunque, comúnmente, a las sustancias aisladas de los venenos también se les conoce como toxinas (Xie y cols., 2017).

■ **Pez león contra el cáncer**

■ El cáncer conforma un grupo de enfermedades caracterizadas por el crecimiento y la propagación descontrolada de células anormales debido a una amplia gama de cambios genéticos. Los tipos de cáncer más comunes en México son el cáncer de mama, el de próstata y el de hígado (Reynoso y Torres, 2017); el cáncer es la tercera causa de decesos en nuestro país y una de las principales causas de muerte en el mundo.

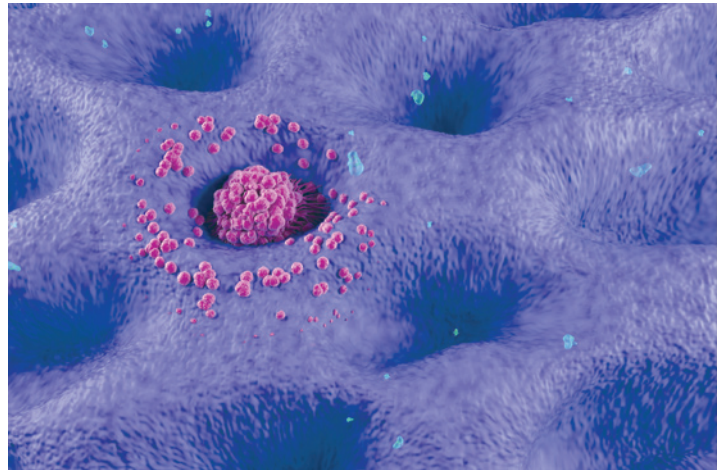
En la actualidad, los tratamientos contra el cáncer consisten en procedimientos quirúrgicos, radioterapia, agentes quimioterapéuticos o la combinación de quimioterapia y terapia hormonal con inmunoterapia. Sin embargo, la tasa de prevalencia de esta enfermedad persiste en el mundo debido a que ciertos tumores son resistentes a algunos compuestos anticancerígenos. Por ello, es necesario investigar nuevas moléculas que maximicen el control tumoral y minimicen los efectos secundarios en las personas para que tengan una mejor calidad de vida (véase el Recuadro 1).

La mayoría de los agentes quimioterapéuticos usados contra el cáncer presentan propiedades tóxicas para las células (citotóxicas); los venenos de muchos organismos marinos son una fuente importante de compuestos citotóxicos. Por ejemplo, en el veneno del pez león se ha descubierto un **péptido**, denominado FV, que provoca la muerte celular en células cancerosas que proliferan de manera activa (Balasu-

Recuadro 1. Mecanismos moleculares del cáncer

Aunque existen diferentes tipos de cáncer, la mayoría comparte ciertas características. En los tumores humanos se han identificado seis principales mecanismos moleculares, los cuales se busca atacar mediante los compuestos antitumorales (Nagle y cols., 2004):

1. Independencia en las señales de crecimiento celular.
2. Insensibilidad a señales inhibitorias del crecimiento.
3. Evasión de la muerte celular programada (apoptosis).
4. Potencial replicativo ilimitado.
5. Angiogénesis (formación de vasos sanguíneos en el interior del tumor).
6. Invasión en tejidos celulares y metástasis (diseminación del cáncer).



bashini y cols., 2006). Ahora bien, es necesario realizar más investigación para llegar a desarrollar un medicamento a partir de esta sustancia, debido a que en la creación de estos productos se deben cumplir diferentes etapas (tres fases clínicas) antes de su aplicación.

■ **Pez león y neurociencia**

■ El funcionamiento del sistema nervioso depende de unas células llamadas neuronas, que se especializan según su función; por ejemplo, las neuronas

Péptido

Molécula formada por la unión de varios aminoácidos (aproximadamente menos de 50) mediante enlaces peptídicos.

motoras son las encargadas de enviar mensajes del cerebro a todo el cuerpo, mientras que las neuronas sensoriales transmiten la información de diferentes órganos hacia el cerebro. Las neuronas se comunican entre sí y establecen diferentes conexiones mediante un proceso electroquímico; estas interacciones funcionales se denominan sinapsis (véase el Recuadro 2).

De entre la gran variedad de toxinas producidas por los animales venenosos, las que ejercen acción sobre el sistema nervioso (al afectar la estructura o función de los elementos neurales) son conocidas como neurotoxinas. En su mayoría, éstas funcionan como **ligandos** altamente específicos de proteínas presentes en las neuronas, debido a la extrema complejidad estructural, bioquímica y homeostática del sistema nervioso. Por ello, dichas moléculas son útiles como herramientas para el estudio de este sis-

Ligando ▶ Molécula (usualmente pequeña) que se une específicamente a una molécula más grande para formar un complejo capaz de producir una señal.

tema, así como para el uso como agentes terapéuticos contra enfermedades neurológicas (Salceda y Ortega, 2009).

Desde el punto de vista biológico, la especificidad de las toxinas de un animal venenoso brinda diversas ventajas cuando la velocidad de ciertos procesos, como provocar la parálisis de la presa, es un factor importante; esta especificidad permite un uso más rápido y eficiente de las moléculas involucradas. Así, restringir la unión de una toxina al subtipo de receptor más relevante para determinado mecanismo fisiológico evita su desperdicio y, consecuentemente, permite una mayor producción (Salceda y Ortega, 2009).

En el caso del pez león, se ha estudiado que el veneno crudo (con todos sus componentes; es decir, sin ningún proceso de purificación) tiene efectos en el sistema nervioso, principalmente en la sinapsis quí-

Recuadro 2. Sinapsis eléctrica y sinapsis química

En el sistema nervioso, las células se comunican por medio de dos tipos de sinapsis (Figura 3).

Sinapsis eléctrica: la información se transmite por corrientes de iones de una célula a otra mediante unas uniones entre las células. Estas uniones, denominadas *gap*, son pequeños canales iónicos formados por proteínas llamadas conexinas.

Sinapsis química: el mensaje se transmite mediante sustancias conocidas como neurotransmi-

sores, para lo cual es necesario que la neurona presináptica sintetice el neurotransmisor y lo libere al espacio intersináptico para que pueda unirse a los receptores postsinápticos, formados de varias subunidades proteicas. El neurotransmisor que no se une a los receptores es degradado por enzimas o regresado a la neurona presináptica por medio de transportadores.

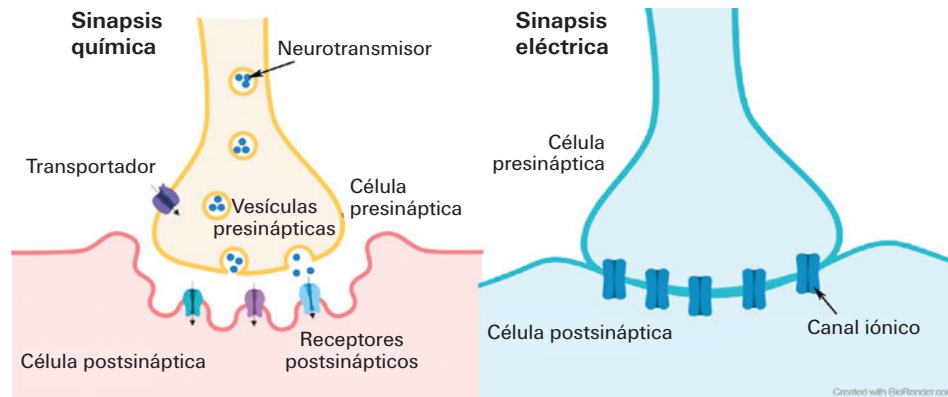


Figura 3. Tipos de sinapsis. Esquema elaborado por Mayra Pamela Becerra Amezcua.



mica colinérgica (Church y Hodgson, 2002), en la cual el neurotransmisor principal es la acetilcolina, relacionada con procesos fisiológicos importantes, como la memoria, el aprendizaje, el movimiento de los músculos y el corazón, entre otros. La acetilcolina se une a dos tipos de receptores: los muscarínicos y los nicotínicos. Los muscarínicos fueron nombrados así por la acción de la muscarina, una toxina aislada del hongo *Amanita muscaria*; este tipo de receptores colinérgicos son los más abundantes y, a su vez, tienen cinco diferentes subtipos (M1-M5), clasificados de acuerdo con su localización y funcionamiento, sobre todo en el cerebro. Por otro lado, los receptores nicotínicos son llamados así debido a que son activados por la nicotina, una sustancia encontrada principalmente en la planta del tabaco: *Nicotiana tabacum*; estos receptores se componen de cinco subunidades proteicas, cuya combinación les confiere un amplio rango de perfiles fisiológicos y farmacológicos, como el control voluntario del movimiento, la atención, el sueño, el dolor y la ansiedad.

Mucus ▶
 Secreción viscosa de las membranas mucosas. Contiene mucina, glóbulos blancos, agua, sales inorgánicas y células exfoliadas.

Según se ha estudiado, un extracto del tejido de la espina venenosa del pez león contiene acetilcolina, que es capaz de diferenciar entre subtipos de receptores nicotínicos (Cohen y Olek, 1989), lo que le brinda el potencial de ser utilizado como herramienta molecular para estudiar enfermedades relacionadas

a este tipo de sinapsis por ejemplo, Alzheimer, esquizofrenia y depresión. Otro tipo de sinapsis afectada por el veneno crudo del pez león es la dopaminérgica (Church y Hodgson, 2002), cuyo neurotransmisor principal es la dopamina, relacionada con la actividad motora, la integración de los sistemas sensorial y motor, y el aprendizaje mediado por recompensa. Por su efecto en este sistema, el veneno del pez león podría funcionar como herramienta molecular para estudiar enfermedades como Parkinson, esquizofrenia y trastornos del sueño.

■ **Actividad antibacteriana del veneno del pez león**

Las bacterias son microorganismos que habitan en todas partes; algunas tienen beneficios para la salud humana, pero otras son nocivas y provocan enfermedades. Los antibióticos se encargan de impedir que las bacterias crezcan y se reproduzcan, aunque el abuso de su consumo ha generado nuevos organismos resistentes y difíciles de combatir. El **mucus** presente en la piel del pez león contiene un grupo diverso de bacterias capaces de producir compuestos antibacterianos, por lo que ésta puede ser una fuente importante para la búsqueda de medicamentos con tal propósito (Stevens y cols., 2016).



Proteasas del veneno del pez león con fines industriales

Las proteínas son macromoléculas que desempeñan diferentes funciones en el organismo. Dentro de las proteínas, se encuentran las enzimas, que se encargan de controlar los procesos metabólicos en las células, ya que catalizan (aceleran) las reacciones bioquímicas. Las enzimas encargadas de catalizar reacciones de hidrólisis de proteínas son llamadas enzimas proteolíticas o proteasas, las cuales poseen múltiples aplicaciones en procesos industriales, como la producción de detergentes, textiles, alimentos y medicamentos.

Cabe considerar que las enzimas extraídas de organismos marinos tienen ventajas sobre las de origen terrestre o microbiano por su actividad y estabilidad en condiciones de reacción extremas. El extracto crudo del veneno del pez león contiene proteasas de tipo metaloproteasa, cuya actividad es inhibida con temperaturas mayores de 60 °C. Estas enzimas requieren la presencia de un átomo metálico para poder degradar proteínas (Manso y cols., 2015), lo que resulta en cadenas más cortas (péptidos) y aminoácidos libres. Las proteasas pueden ser utilizadas en diferentes industrias como ablandadores de carne, clarificadores de cerveza y para la elaboración de bebidas y alimentos, como panes, galletas y quesos, entre otras aplicaciones.

Mayra Pamela Becerra Amezcua

Centro de Investigación y de Estudios Avanzados, unidad Mérida.
mayrapame@gmail.com

Arisaí C. Hernández Sámano

Instituto de Neurobiología, Universidad Nacional Autónoma de México, campus Juriquilla.
arizai5@hotmail.com

Referencias específicas

- Aguilar-Perera, A., L. Quijano-Puerto y E. Carrillo-Flores (2015), *Manual de técnicas para disección del pez león, Pterois volitans, del sureste del Golfo de México*, Mérida, Fundación UADY-CONANP-CCBA/Universidad Autónoma de Yucatán.
- Balasubashini, M., S. Karthigayan, S. T. Somasundaram, T. Balasubramanian, R. Rukkumani y P. M. Venugopal (2006), "FV peptide induces apoptosis in HEP 2 and HeLa cells: an insight into the mechanism of induction", *Journal of Carcinogenesis*, 5:27-36.
- Church, J. E. y W. C. Hodgson (2002), "Adrenergic and cholinergic activity contributes to the cardiovascular effects of lionfish (*Pterois volitans*) venom", *Toxicology*, 40:787-796.
- Cohen, A. S. y A. J. Olek (1989), "An extract of lionfish (*Pterois volitans*) spine tissue contains acetylcholine and a toxin that affects neuromuscular transmission", *Toxicology*, 27(12):1367-1376.
- Manso, L., U. Ros, G. Valdés, M. Alonso del Rivero, M. E. Lanio y C. Álvarez (2015), "Actividad hemolítica y proteolítica en el veneno del Pez León *Pterois volitans*, especie invasora de las costas cubanas", *Revista Cubana de Ciencias Biológicas*, 4(2):57-63.
- Nagle, D., Z. Yu-Dong, F. D. Mora, K. A. Mohammed y K. Yong-Pil (2004), "Mechanism Targeted Discovery of Antitumor Marine Natural Products", *Current Medicinal Chemistry*, 11(13):1725-1756.
- Reynoso-Noverón, N. y J. A. Torres-Domínguez (2017), "Epidemiología del cáncer en México: carga global y proyecciones 2000-2020", *Revista Latinoamericana de Medicina Conductual*, 8(1):9-15.
- Salceda, E. y A. Ortega (2009), "Neurotoxinas: significado biológico y mecanismos de acción", *Elementos*, 74:29-37.
- Stevens, J. L., R. L. Jackson y J. B. Olson (2016), "Bacteria associated with lionfish (*Pterois volitans*/miles complex) exhibit antibacterial activity against known fish pathogens", *Marine Ecology Progress Series*, 558:167-180.
- Xie, B., Y. Huang, K. Baumann, B. G. Fry y Q. Shi (2017), "From Marine Venoms to Drugs: Efficiently Supported by a Combination of Transcriptomics and Proteomics", *Marine Drugs*, 15(4):103-113.

Hidrólisis

Proceso de ruptura de un compuesto químico, mediante la adición de una molécula de agua.

María de la Luz Avendaño Yáñez y Yareni Perroni Ventura

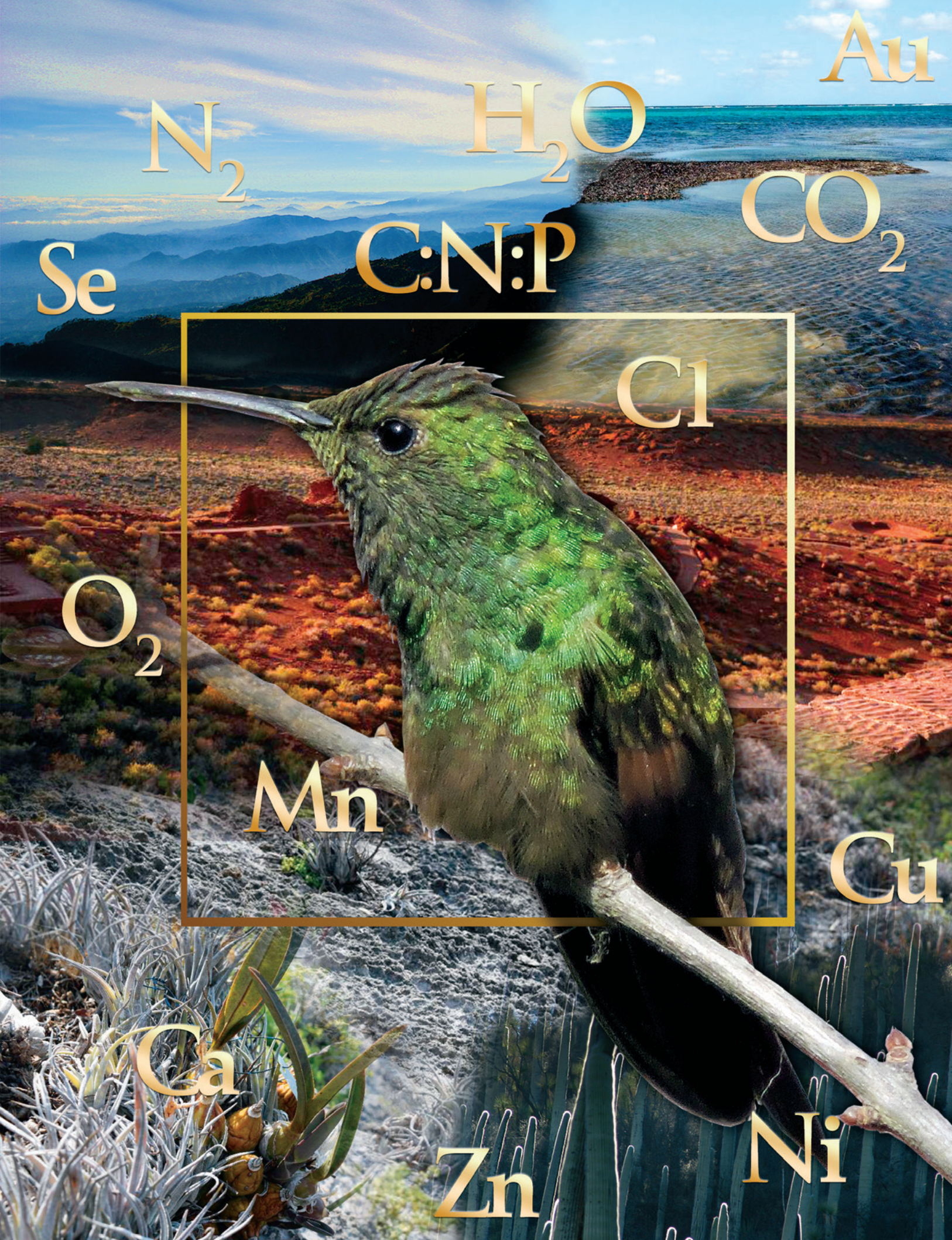
Biogeoquímica, la historia cambiante de un planeta vivo

La historia de la evolución biogeoquímica de la Tierra es larga e interesante. La transformación de pocos elementos y minerales durante la formación planetaria hasta la aparición de la vida generó la biogeoquímica actual e impulsó la coevolución de la geósfera y la biósfera. La fotosíntesis oxigénica cambió las condiciones de la atmósfera y la actividad humana aceleró algunos cambios importantes.

¿Qué es la biogeoquímica?

La biogeoquímica es una disciplina que integra aspectos biológicos, geológicos y químicos de los ecosistemas, con el objetivo de estudiar el transporte y la transformación de la materia y la energía en el planeta. Mediante el enfoque biogeoquímico, podemos conocer cómo los seres vivos modifican la distribución de los elementos químicos en la superficie de nuestro planeta, en un contexto de reacciones de óxido-reducción (redox), en las cuales las sustancias que se combinan intercambian electrones. Asimismo, esta disciplina puede explicar cómo el ambiente químico influye en y dirige la evolución de la vida y la coevolución de la geósfera y la biósfera; es decir, podemos estudiar cómo evolucionaron de manera conjunta la porción sólida de la Tierra (también llamada litósfera) y el espacio en el que se desarrolla la vida y los productos que generan los organismos vivos (véase el Recuadro 1). Además, a partir del supuesto del balance de masas (la materia y la energía no se crean ni se destruyen, sólo se transforman), la biogeoquímica puede entender, proponer y poner a prueba hipótesis respecto a la relación y el funcionamiento de los organismos como sistemas de adquisición y transformación de materia y energía.

Todos los seres vivos estamos constituidos principalmente por 27 elementos, pero seis de ellos son los elementos químicos básicos; a saber, en orden de importancia: hidrógeno (H), oxígeno (O), carbono (C), nitrógeno (N), fósforo (P) y azufre (S). Estos seis elementos son capaces de impulsar los ciclos biogeoquímicos globales (Schlesinger y Bernhardt, 2013) y conforman 95% de la masa de la biósfera. Los organismos, por medio de sus procesos metabólicos, alteran las concentraciones de los elementos químicos presentes en su entorno; a su vez, el



Au

N_2

H_2O

CO_2

Se

C:N:P

Cl

O_2

Mn

Cu

Ca

Zn

Ni

Recuadro 1.

Un breve relato de miles de millones de años

La historia de la evolución biogeoquímica de la Tierra inició con la transformación de pocos elementos y minerales durante la formación planetaria, hace aproximadamente 4 500 millones de años, hasta el incremento a miles de minerales generados por eventos como el vulcanismo o las glaciaciones y, sobre todo, por la aparición de la vida en el planeta, hace 4 200 millones a 3 800 millones de años. Rápidamente, la vida transformó los procesos geoquímicos de la Tierra primitiva a procesos biogeoquímicos, los cuales impulsaron la coevolución de la geósfera y la biósfera; desde entonces, han dirigido los principales cambios químicos en nuestro planeta.

El aumento de oxígeno en la atmósfera por la evolución de la fotosíntesis oxigénica aceleró algunos cambios hace poco menos de 2 500 millones de años, con la modificación de las condiciones de una atmósfera reductora, rica en dióxido de carbono,

ácido sulfhídrico y metano, a una atmósfera oxidante, rica en nitrógeno (cerca de 80%) y oxígeno (aproximadamente 20%). A su vez, la oxigenación de la atmósfera terrestre diversificó e intensificó los productos generados por los organismos vivos. Mientras que la transformación química terrestre hacia condiciones oxigénicas duró miles de millones de años, en tan sólo dos siglos la humanidad ha alterado drásticamente los ciclos biogeoquímicos de algunos elementos químicos esenciales, como carbono, nitrógeno, fósforo y azufre; asimismo, ha provocado cambios globales en la química de la atmósfera terrestre. Nuestra conducta como una especie que influye en los flujos globales de los elementos tendría que considerar las consecuencias de los cambios en la biogeoquímica de su propio entorno y tomar nota de la cambiante historia de este planeta vivo.

entorno es capaz de limitar la constitución y los procesos metabólicos de los organismos. En este sentido, desde la aparición de la vida en nuestro planeta, los elementos esenciales se transportan entre los diferentes reservorios bióticos (seres vivos) y abióticos (aire, suelo, agua) de la corteza oceánica y continental del planeta y se van transformando a diferentes velocidades. La biogeoquímica nos ayuda a comprender esa compleja y dinámica interacción entre los organismos y el ambiente químico del planeta. Es decir, podemos conocer la diversidad de formas de adquisición de elementos esenciales y las rutas metabólicas de los seres vivos que evolucionan y, de manera inevitable, modifican la química terrestre, al generarse balances o desbalances temporales.

■ ■ ■ El caótico origen de la Tierra

El origen de nuestro planeta se remonta a unos 4 500 millones de años atrás, cuando sólo era una masa rocosa extremadamente caliente, formada por elementos químicos pesados, como hierro y níquel,

principalmente. Se piensa que hubo una fase temprana de agregación (incremento de tamaño) que integró materiales pesados que eran relativamente abundantes en nuestra galaxia. Posteriormente, en una fase tardía de agregación se integraron elementos ligeros, como carbono, nitrógeno y gases nobles (provenientes de meteoritos y desgasificaciones del manto terrestre), además de silicio, magnesio y oxígeno. Asimismo, se formó una corteza dominada por aluminosilicatos (aluminio y sílice) y feldespatos (aluminio, calcio, sodio y potasio) que flotaban sobre las pesadas rocas semifluidas del manto terrestre. Después de la fase tardía de agregación, nuestro naciente planeta se caracterizó por una liberación masiva de gases (desgasificación del manto), los cuales contenían grandes cantidades de carbono, oxígeno, hidrógeno, nitrógeno y azufre. Estos elementos se combinaron para formar compuestos que originaron gradualmente una atmósfera primitiva reductora (sin oxígeno libre), saturada de monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), sulfuro de hidrógeno (H₂S) y vapor de agua

(H₂O). A medida que el planeta se enfriaba, el vapor de agua se condensaba, con lo cual se formaron los océanos. En este escenario –hostil y dantesco, desde nuestra perspectiva humana– se desencadenaría uno de los eventos más extraordinarios que hacen especial a nuestro planeta en el Sistema Solar: ¡la vida!

■ ¿Cómo surgió la vida en la Tierra?

■ Antes de entrar en detalles es importante mencionar cuáles son las características básicas que tiene un ser vivo: 1) una membrana física en la que pueden aislarse del ambiente los bloques o “ladrillos” que construyen y constituyen la vida, como aminoácidos, péptidos, ribosa, ácidos nucleicos, nucleótidos y oligonucleótidos; 2) una maquinaria metabólica que permite la obtención de materia y energía del ambiente; y 3) una capacidad de replicarse a partir de la información genética contenida en el ADN y el ARN. Ahora sí, hablemos sobre las teorías del origen de la vida, las cuales concuerdan en que surgió en medio de un caos químico y físico (el ambiente abiótico).

Una de las explicaciones más ampliamente conocidas postula que la vida en la Tierra surgió en los primitivos mares terrícolas, en ambientes hidrotermales de ventosas marinas con una atmósfera cálida, reductiva y con abundante CO₂ y CH₄, además de una alta radiación ultravioleta (UV). Estos factores generaron reacciones químicas que dieron origen a las moléculas orgánicas simples y, más tarde, a los organismos vivos. Sin embargo, de acuerdo con Kitadai y Maruyama (2018), la evolución química de la vida no pudo ocurrir en un solo escenario, dado que un sistema tan complejo requiere de ambientes altamente diversos y dinámicos, que están conectados unos con otros y que permiten el transporte con circulación fluida de productos y reactantes originados de las reacciones químicas que se llevan a cabo en estos ambientes.

En ese sentido, la evolución química de la vida incluye: un ambiente con gas reductor (atmósfera primitiva terrestre y vulcanismo), otros ambientes con pH alcalino (océanos salados) y reservorios de agua fresca no salada; además de la presencia de ciclos de temperaturas de congelación (glaciaciones), ciclos de sequía y humedad acoplados a reacciones

de alta energía y ciclos de enfriamiento y calentamiento de agua. Asimismo, para el caso terrestre, incluyó entradas extraterrestres de elementos esenciales, como el carbono y el nitrógeno, de compuestos orgánicos o bloques de construcción de la vida, como los aminoácidos y los péptidos, además de nutrientes reactivos, como el fósforo, provenientes de meteoritos, micrometeoritos, cometas y partículas de polvo interplanetario. Cabe señalar que algunos compuestos orgánicos pudieron haberse originado en los meteoritos y cometas, ya que se han encontrado alrededor de 80 tipos de aminoácidos en algunas **condritas carbonáceas**, lo cual sugiere que la síntesis abiótica de moléculas orgánicas también puede ocurrir fuera de nuestro planeta.

■ Cambios químicos impulsados por la aparición de la vida en el planeta

■ El origen de los primeros fósiles en la Tierra puede rastrearse entre 3 800 millones y 3 500 millones de años atrás. Estos fósiles son estromatolitos (*stroma* = “capas” y *litos* = “roca”), los cuales son comunidades de bacterias y arqueas. No obstante, se estima que la vida pudo haber comenzado hace casi 4 200 millones de años. Los primeros microorganismos, posiblemente procariontes (sin organelos intracelulares y con metabolismo anaerobio), comenzaron a modificar la química terrestre por el simple hecho de tomar elementos del medio (C, H, O, N, P, S, entre otros) en un contexto de reacciones redox para construir sus cuerpos unicelulares e intercambiar compuestos químicos con el exterior a través de su metabolismo. Por ejemplo, una de las rutas metabólicas de los microorganismos primitivos implicaba la producción de metano (CH₄) mediante su transformación redox a moléculas orgánicas simples, como el acetato (C₂H₃COOH). La gran aportación de los procariontes a la química terrestre es la diversidad de rutas metabólicas que desarrollaron, en las que se incluyen varios de los ciclos biogeoquímicos conocidos (véase la Tabla 1).

Otro ejemplo de cambio químico a gran escala impulsado por la vida fue el que hicieron los organismos fotosintéticos que utilizaron la luz para llevar a cabo sus funciones metabólicas en una atmósfera reductora

condritas carbonáceas

Un tipo de meteoritos rocosos, no metálicos, en los que se han encontrado elementos y minerales.

ADN

Molécula que almacena la información genética necesaria para la reproducción de los organismos.

ARN

Molécula implicada en la replicación del ADN y en la síntesis de proteínas específicas.

Tabla 1. Algunas rutas metabólicas asociadas a los cambios químicos en la biósfera (Jelen y cols., 2016).

Ruta metabólica	Producto principal obtenido	Compuesto que recibe los electrones	Organismo que lleva a cabo la ruta metabólica	Condición requerida
Metanogénesis	Metano (CH ₄)	Dióxido de carbono (CO ₂)	Arqueas (procarionte)	Anaerobia
Acetogénesis	Acetato (CH ₃ COOH)	Metano (CH ₄)	Bacterias (procarionte)	Anaerobia
Fijación biológica del nitrógeno atmosférico	Amoniaco (NH ₃)	Dinitrógeno (N ₂)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Reducción de sulfato	Sulfuro (HS ⁻)	Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Reducción de azufre	Sulfuro (HS ⁻)	Azufre (S ⁰)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Fermentación	Ácido láctico (H ₃ C-CH(OH)-COOH)	Piruvato (C ₃ H ₄ O ₃)	Bacterias (procarionte), hongos, algunos animales y protistas (eucarionte)	Anaerobia
Reducción de nitrato	Nitrito (NO ₂ ⁻)	Nitrato (NO ₃ ⁻)	Bacterias y arqueas	Aerobia
Reducción de óxido nítrico	Óxido nitroso (N ₂ O)	Óxido nítrico (NO)	Bacterias y arqueas	Aerobia
Reducción de óxido nitroso	Dinitrógeno (N ₂)	Óxido nitroso (N ₂ O)	Bacterias y arqueas	Aerobia
Respiración oxigénica	Dióxido de carbono (CO ₂) y agua (H ₂ O)	Azúcares (C ₆ H ₁₂ O ₆) y oxígeno molecular (O ₂)	Bacterias (procarionte), plantas y animales (eucarionte)	Aerobia
Fotosíntesis anoxigénica	Carbohidratos (CH ₂ O), azufre (S ⁰) y agua (H ₂ O)	Luz + ácido sulfhídrico (H ₂ S) y dióxido de carbono (CO ₂)	Bacterias y arqueas	Anaerobia
Fotosíntesis oxigénica	Azúcares (C ₆ H ₁₂ O ₆), oxígeno molecular (O ₂) y agua (H ₂ O)	Luz + dióxido de carbono (CO ₂) y agua (H ₂ O)	Bacterias (procarionte), plantas y algas (eucarionte)	Aerobia

Ligando
Molécula (usualmente pequeña) que se une específicamente a una molécula más grande para formar un complejo capaz de producir una señal.

(fotosíntesis anoxigénica) y posteriormente en una atmósfera con incrementos de oxígeno (fotosíntesis oxigénica). Hace aproximadamente 2 700 millones de años se acumuló suficiente oxígeno en la atmósfera a partir de la fotosíntesis oxigénica, lo que llevó al cambio de una atmósfera reductora a una oxidante.

Las cianobacterias, ancestros de las plantas, y su exitoso mecanismo fotosintético modificaron de una manera sin precedentes la química arcaica de la atmósfera terrestre, rica en CO₂ y CH₄, al generar oxígeno, un producto de desecho para ellas. Las altas concentraciones de CO₂ y CH₄ que provocaban un efecto invernadero asfixiante en nuestro planeta decrecieron gradualmente al paso de millones de años, mientras se incrementó el oxígeno atmosférico. La producción de oxígeno llevó a la formación de la capa de ozono (O₃) en la estratósfera, la cual es un manto protector de la radiación UV. Esto permitió aún más la diversificación de la vida y la aparición de organismos capaces de utilizar el abundante oxígeno

atmosférico. Otra característica de las cianobacterias ancestrales y actuales es su capacidad para fijar el nitrógeno atmosférico (N₂), un gas abundante. En la actualidad, la mayor fijación de N₂ en los océanos (80%) se atribuye a las cianobacterias de los géneros *Trichodesmium* y *Crocosphaera*; algunas de estas especies podrían haber sido determinantes para el funcionamiento químico de la atmósfera terrestre en los últimos 2 500 millones de años, debido a su influencia global en el ciclo del carbono y del nitrógeno. Éstos son sólo algunos ejemplos de cómo los organismos pueden modificar a gran escala la química del planeta a lo largo del tiempo; sin duda, la vida tal como hoy la conocemos es posible gracias a los cambios químicos que impulsaron los seres vivos que nos precedieron.

La especie humana como factor de cambio

Homo sapiens es la especie que ha inducido los cambios biogeoquímicos más importantes en la historia

reciente del planeta, en un tiempo relativamente corto en comparación con los cambios a escala geológica. Como señalan Falkowski y cols. (2000), hemos alterado los ciclos biogeoquímicos en al menos +13% para el carbono, +108% el del nitrógeno, +400% en el caso del fósforo, +113% el del azufre, y +16% para el hidrógeno y el oxígeno (ciclo del agua), sólo por mencionar algunos elementos.

Por ejemplo, el CO_2 ha aumentado de 280 ppm (partes por millón) a poco más de 400 ppm en los últimos 200 años, lo que genera el calentamiento global y la acidificación de los océanos. Asimismo, el incremento acelerado del uso de combustibles fósiles está provocando grandes cambios en las condiciones químicas de la Tierra, las cuales se habían mantenido relativamente estables durante los últimos 8 000 años de historia de la sociedad humana organizada. Algunos datos revelan que cada año quemamos el equivalente de la materia orgánica almacenada durante ¡400 años! y hemos duplicado la entrada de nitrógeno por fijación biológica en cultivos como el arroz (60 Tg N por año = 10^{12} g N por año) y por fijación industrial (136 Tg N por año), además de las emisiones (25 Tg N por año) por la quema de combustibles fósiles en ciudades y zonas industriales (Schlesinger y Bernhardt, 2013). También hemos utilizado de manera irracional e ineficiente los nutrientes en la agricultura mediante fertilizantes con nitrógeno y fósforo en dosis que las plantas no son capaces de usar en su totalidad (sólo usan entre 40% y 60% del fertilizante; el resto se pierde e incorpora a la atmósfera o a los reservorios de agua, con lo que se contaminan lagos, ríos, mantos freáticos y océanos). Éstas son algunas acciones humanas que han impulsado grandes cambios en la composición química de la atmósfera y de la litósfera, tan sólo en los últimos 200 años.

El conocimiento de los aspectos biogeoquímicos de nuestro entorno puede ayudarnos a reflexionar con mayor profundidad, pero sobre todo a actuar, corregir y cambiar nuestras conductas cotidianas. Por ejemplo, empecemos por usar poca pasta para lavarnos los dientes o consumir menores dosis de hormonas orales; si tenemos un sistema de drenaje, ¿adónde se van el flúor y los compuestos hormona-

les?, ¿qué consecuencias tendrán en los organismos acuáticos? Hoy se nos presenta el reto de buscar las mejores formas de transitar hacia una sociedad que disminuya sus emisiones de CO_2 y CH_4 a la atmósfera. Asimismo, el manejo del suelo es primordial, en especial para elementos como el fósforo, el cual es escaso en la superficie de la corteza terrestre, y no hay forma de sustituirlo. Debemos buscar alternativas para cultivar nuestros alimentos, que impacten lo menos posible en los procesos químicos, físicos y biológicos del suelo. Recordemos que incluso las acciones pequeñas, sumadas, pueden hacer grandes cambios para mantener el balance de los ciclos biogeoquímicos que hacen posible la existencia de las especies que se conservan actualmente en nuestro planeta. El enfoque que ofrece la biogeoquímica nos ayuda a comprender la magnitud de la influencia de la vida en la transformación química de nuestro planeta y los escenarios a futuro, aunque también nos ayuda a rastrear posibles huellas de formas de vida en otras partes del universo.

María de la Luz Avendaño Yáñez

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada,
Universidad Veracruzana.
luzavend@gmail.com

Yareni Perroni Ventura

Instituto de Biotecnología y Ecología Aplicada,
Universidad Veracruzana.
yperroni@uv.mx

Referencias específicas

- Falkowski, P. *et al.* (2000), "The global carbon cycle: A test of our knowledge of earth as a system", *Science*, 290:291-297.
- Jelen, B. I., D. Giovannelli y P. G. Falkowski (2016), "The Role of Microbial Electron Transfer in the Coevolution of the Biosphere and Geosphere", *Annual Review of Microbiology*, 70:45-62.
- Kitadai, N. y S. Maruyama (2018), "Origins of building blocks of life: A review", *Geoscience Frontiers*, 9: 1117-1153.
- Shlesinger, W. H. y E. Bernhardt (2013), *Biogeochemistry: an analysis of global change*, 3.^a ed., Ámsterdam, Elsevier.

Israel González Saavedra y Laura Virginia Adalid Peralta

La importancia del tratamiento de la enfermedad de Parkinson

En la enfermedad de Parkinson mueren ciertas neuronas en el cerebro que producen una sustancia llamada dopamina; los pacientes reciben medicamentos que compensan la falta de este neurotransmisor. Aunque parecerían temas separados, se ha descubierto que el tratamiento también podría tener efectos en el sistema inmune de las personas, por lo que es muy importante que sigan las indicaciones médicas para mejorar su calidad de vida.

Parkinson: la importancia de seguir el tratamiento

Benjamín (nombre ficticio) tiene 75 años. Poco después de cumplir los 60 sintió un ligero temblor en la mano izquierda, pero no le dio importancia. Meses después percibió otro temblor, ahora en la pierna izquierda, así como rigidez al caminar y cierta lentitud en los movimientos. Esto no le impedía realizar sus actividades y siguió ignorándolo. Un año después el temblor empeoró, ahora en ambas manos. Su esposa cuenta que cuando Benjamín dormía parecía que actuara sus sueños: lloraba, movía los pies como si caminara y platicaba solo. Él refiere que cuando caminaba sentía que estaba adherido al piso, o bien que iba a caerse. Entonces buscaron ayuda médica y Benjamín fue referido al Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía (INNN), donde le diagnosticaron la enfermedad de Parkinson y le indicaron el tratamiento a seguir.

Benjamín cuenta con tristeza que tres años después de asistir a la consulta dejó de tomar los medicamentos durante varios meses: “En ese tiempo, un amigo me comentó que las medicinas iban a dañarme los riñones y el hígado, y que a la larga me iban a dar más problemas”. Él decidió creerle a su amigo en vez de consultar a sus médicos, lo que le trajo consecuencias graves. Por desgracia, los síntomas empeoraron de tal manera que interfirieron con su actividad laboral y debió usar una silla de ruedas; además, empezó a necesitar ayuda para vestirse, bañarse y comer, lo que detonó un episodio depresivo y afectó la dinámica familiar.



■ **¿Qué tan común es la enfermedad de Parkinson?**

■ El caso de Benjamín no es único; entre 1% y 2% de la población mundial mayor de 60 años padece la enfermedad de Parkinson. De acuerdo con el conteo de población y vivienda realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 10.5% de la población mexicana se encuentra en este rango de edad, lo cual significa que durante 2015 había entre 125 900 y 251 800 personas con la enfermedad. Esto requiere consideración especial, porque representa un sector importante, y a veces olvidado, de la población en México.

En los textos de Claudio Galeno, célebre médico griego de la antigüedad y responsable de grandes aportes a la medicina, se mencionan algunos casos de personas con temblores y alteraciones en la forma del caminar, aunque no ofreció un diagnóstico preciso. En 1817, el cirujano británico James Parkinson publicó la obra *Un ensayo sobre la parálisis agitante*, donde describió por primera vez la enfermedad que hoy lleva su nombre. La principal aportación de Parkinson fue agrupar en un solo padecimiento diversas alteraciones de los movimientos que hoy se conocen como temblor en reposo, bradicinesia (lentitud en los movimientos), rigidez muscular e inestabilidad postural (equilibrio y coordinación debilitados). Cabe recalcar que no cualquier temblor se debe a la enfermedad de Parkinson, por lo que las personas deben acudir a consulta médica antes de tomar cualquier medicamento.

■ **¿Qué sucede en el cerebro durante la enfermedad de Parkinson?**

■ La enfermedad de Parkinson es una patología neurodegenerativa; esto quiere decir que es un padecimiento en el que las neuronas dejan de funcionar o mueren. Específicamente, la característica más importante de la enfermedad de Parkinson es la pérdida de las neuronas productoras de dopamina (neuronas dopaminérgicas), un componente indispensable para la conducción nerviosa en ciertas partes del cerebro. Para entender mejor este padecimiento, es importante conocer las sustancias y estructuras que se ven afectadas.

La neurona es la unidad funcional de nuestro cerebro; es una célula alargada que está especializada en conducir los impulsos nerviosos, estímulos eléctricos y químicos que activan o desactivan la función de otras neuronas. Pueden distinguirse tres partes fundamentales en la neurona: el soma o cuerpo celular, cuya función principal es coordinar su funcionamiento y mantenerla con vida, al captar y procesar los nutrientes necesarios; las dendritas, encargadas de recibir la información de otra neurona, y el axón, que transmite la información hacia las dendritas de otra neurona, con lo que se cierra el ciclo (véase la Figura 1). La comunicación entre dendritas y axones es posible gracias a la sinapsis, un pequeño espacio que permite transmitir la información de una neurona a la siguiente mediante los neurotransmisores, que son sustancias químicas producidas por el soma. En la enfermedad de Parkinson, el neurotransmisor más afectado es la dopamina.

Asimismo, la enfermedad de Parkinson afecta ciertas estructuras en el cerebro, como los núcleos basales (véase la Figura 2), que se relacionan con funciones importantes del cuerpo. El núcleo subtalámico y la sustancia negra tienen una función esencial en la regulación de los movimientos; además, se relacionan con la función cognitiva; esto es, los procesos mentales que nos permiten entender el mundo que nos rodea y relacionarnos con él. La sustancia negra se denomina así por su coloración más oscura que las zonas que la rodean, debido a que contiene cantidades mayores de neuromelanina (pigmento producido por algunas neuronas). También se ven afectados el núcleo caudado y el putamen, que forman el cuerpo estriado, así como el núcleo lentiforme, conformado por el putamen y el globo pálido. Es en las neuronas de esta área del cerebro donde se produce la dopamina.

Además de la dopamina, otros neurotransmisores median la comunicación entre las estructuras del cerebro (véase el Cuadro 1). Se han descrito vías de dopamina desde la sustancia negra hacia el núcleo caudado y el putamen (vía nigroestriatal); vías de ácido gamma-aminobutírico (GABA) desde el núcleo caudado y el putamen hacia el globo pálido y la sustancia negra; vías de acetilcolina, desde la corteza

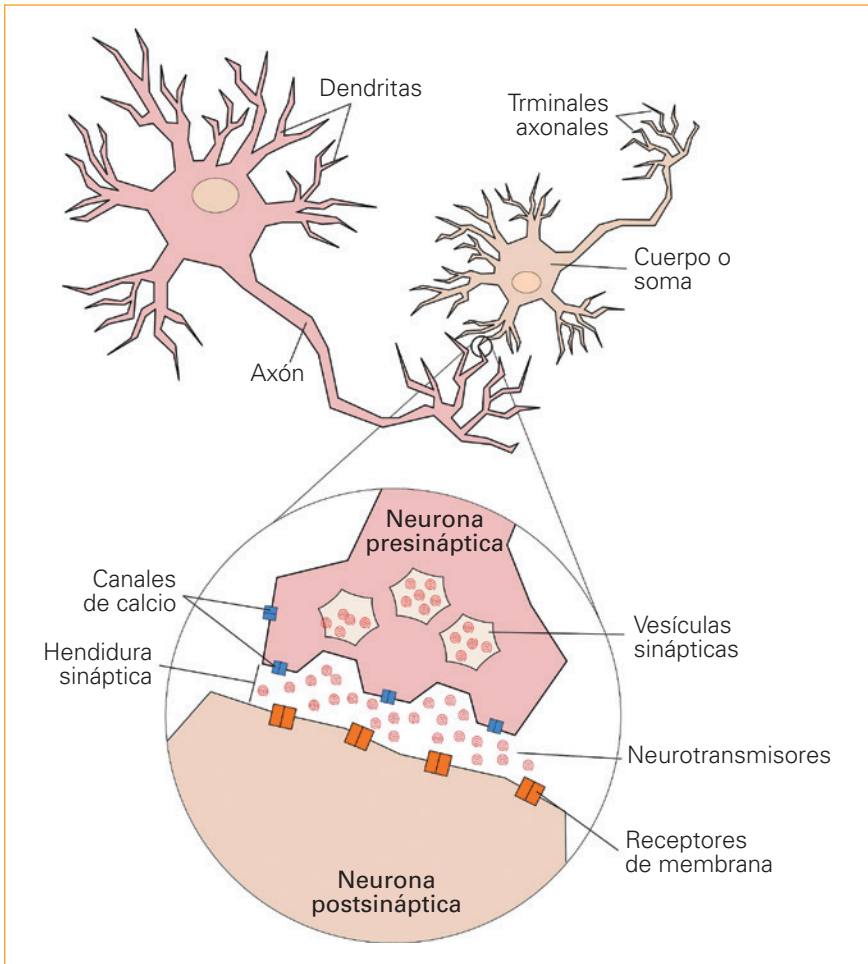


Figura 1. Estructura de una neurona dopaminérgica multipolar y estructura de la sinapsis: la membrana presináptica (rosa) libera los neurotransmisores en la hendidura sináptica; los neurotransmisores se unen a los receptores en la membrana postsináptica (cuadros naranja) para permitir la comunicación entre neuronas.

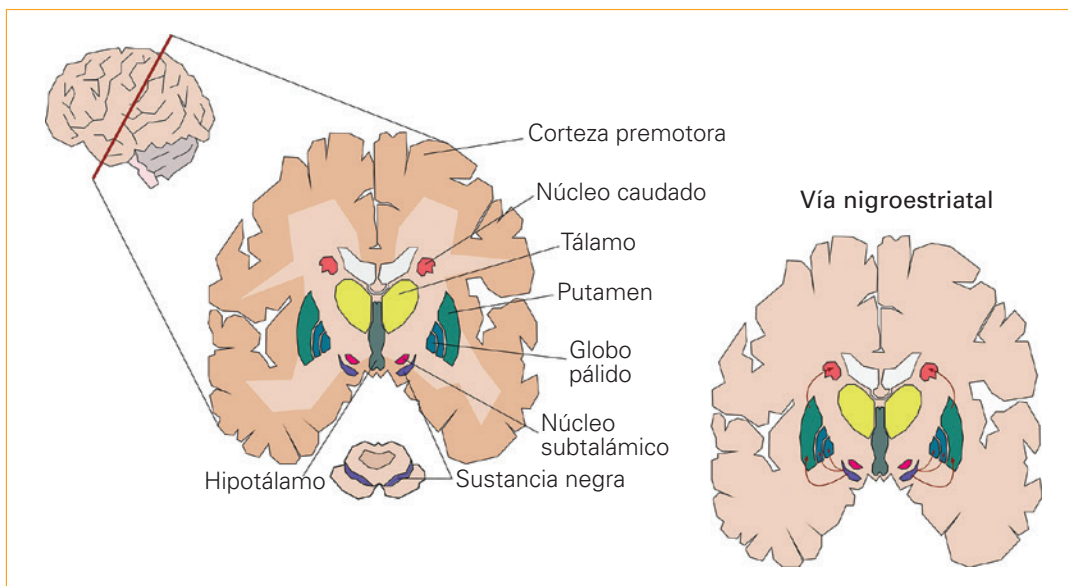


Figura 2. Anatomía de los núcleos basales (corte a nivel de mesencéfalo), una de las principales zonas afectadas en la enfermedad de Parkinson. En la imagen de la derecha, las flechas rojas muestran la vía nigroestriatal, la cual lleva dopamina desde la sustancia negra hacia el cuerpo estriado y el núcleo caudado, y posteriormente al globo pálido y al núcleo ventral del tálamo. Por último, la vía llega a la corteza motora en el lóbulo frontal.

Cuadro 1. Papel de los neurotransmisores en el cuerpo humano y sus alteraciones.

Neurotransmisor	Función	Localización	Desórdenes asociados
Dopamina	Inhibitoria: <ul style="list-style-type: none"> • Motivación. • Estados de ánimo, emociones y memoria. • Regulación del control motor. 	Cerebro	Deficiencia: rigidez muscular y temblores incontrolables (enfermedad de Parkinson)
Acetilcolina	Excitatoria en el cerebro y la médula. <ul style="list-style-type: none"> • Inhibitoria en el corazón: • Estimulación muscular, coordinación motora. • Relacionado con la memoria. 	Cerebro y médula espinal	Deficiencia: parálisis, enfermedad de Alzheimer. Exceso: contracciones musculares violentas (veneno de viuda negra).
GABA	Inhibitoria: <ul style="list-style-type: none"> • Relacionada con la ansiedad. 	Cerebro y médula espinal	Deficiencia: convulsiones, trastorno de ansiedad. Exceso: esquizofrenia.
Norepinefrina	Excitatoria e inhibitoria: <ul style="list-style-type: none"> • Regulación del sueño. • Presión sanguínea. 	Cerebro y algunos órganos	Deficiencia: depresión. Exceso: irritabilidad, hiperactividad.

hasta el núcleo caudado y el putamen, y múltiples vías generales procedentes del tronco del encéfalo, que segregan noradrenalina, serotonina, encefalina y otros neurotransmisores en los núcleos basales, al igual que en otras partes del cerebro. Así, el buen funcionamiento del sistema nervioso central y, en consecuencia, de todo el organismo, depende del equilibrio correcto en los niveles de los neurotransmisores. En la enfermedad de Parkinson, existe un desequilibrio en la vía nigroestriatal, además de disfunciones en otras vías dentro de los núcleos basales.

■ ■ ■ **¿Qué causa la enfermedad de Parkinson y cómo se manifiesta?**

■ Se sabe con certeza que la afección clave en la enfermedad de Parkinson es la disminución de la actividad neuronal, principalmente en la vía nigroestriatal. Esto se debe a la muerte de las neuronas dopaminérgicas en la parte compacta de la sustancia negra. Aunque se desconocen los eventos que llevan a esta muerte neuronal, se han descrito varios factores de riesgo (véase el Cuadro 2).

Todavía no se ha determinado con precisión el tiempo de progresión de la enfermedad, pero se reconocen las etapas que anteceden a la conocida sintomatología motora de Parkinson (véase el Cuadro 3). Los síntomas motores comienzan cuando se

pierde 80% de las neuronas dopaminérgicas, aunque en realidad la enfermedad es progresiva y se inicia años antes.

En la etapa clínica, los pacientes presentan dificultades para caminar, debido en parte al cansancio que provoca el movimiento constante e incontrolado. Además, la pérdida del equilibrio puede provocar lesiones y dejarles en silla de ruedas o en cama, bajo los cuidados de sus familiares o de profesionales de la salud. Por otra parte, los temblores empeoran de tal manera que los pacientes requieren ayuda para vestirse, bañarse y comer. También presentan un exceso de salivación, lo que causa incomodidad cuando intentan hablar, por lo que lo hacen más lentamente, y pueden llegar a perder la capacidad de articular adecuadamente el lenguaje.

Algunas personas con la enfermedad refieren dolores musculares y articulares, calambres, problemas urinarios o estreñimiento y alteraciones para dormir. Adicionalmente, hay cambios en la actividad sexual, que pueden ir desde la excitación constante hasta la anorgasmia y la disfunción eréctil. Asimismo, hay pérdida de la memoria, del razonamiento y otras habilidades mentales, así como depresión, que les lleva al aislamiento social y, en casos graves, al suicidio. Con todas estas complicaciones, es evidente que la enfermedad de Parkinson representa problemas serios para familiares, amistades, cuidadores y, por supuesto, pacientes.

Cuadro 2. Factores de riesgo asociados con la enfermedad de Parkinson.

Factores de riesgo	Descripción
Edad	A mayor edad, mayor es el riesgo de padecer la enfermedad de Parkinson.
Genética	Hay mutaciones del gen que codifica para la α -sinucleína (park1), una proteína que, en condiciones fisiológicas normales, se expresa abundantemente en el cerebro y regula la neurotransmisión. Esta proteína, al ser disfuncional y estar mal plegada, genera alteraciones en su degradación, y su acumulación participa en la muerte neuronal. Otros genes relacionados con la alteración en la degradación de proteínas son park2 y park5; por otra parte, PINK-1 se relaciona con la degeneración mitocondrial, y DJ-1 (PARK7), con el estrés oxidativo de las células.
Toxinas ambientales	El monóxido de carbono y el manganeso dañan las neuronas dopaminérgicas. Asimismo, insecticidas y herbicidas como Paraquat y Diquat, y el fungicida Maneb, son tóxicos para las neuronas dopaminérgicas nigroestriadas.
Mitocondrias	Son estructuras celulares que dan energía a la célula, además de ser fuentes importantes de radicales libres (sustancias tóxicas producidas por el cuerpo), que dañan partes de la célula. Este daño a menudo se conoce como estrés oxidativo. Se han detectado cambios al ADN, proteínas y grasas en los cerebros de personas con la enfermedad de Parkinson.
Formación de cuerpos de Lewy	Acumulaciones tóxicas de proteínas presentes en el cerebro que se relacionan con la demencia, la enfermedad de Parkinson y otros padecimientos.

Cuadro 3. Etapas de la enfermedad de Parkinson.

Etapa preclínica	Etapa premotora (insuficiente para diagnosticar la enfermedad)	Etapa motora (clínica)
Se inicia el proceso de daño neuronal sin evidencia observable.	Se detectan síntomas de daño neuronal: <ul style="list-style-type: none"> • Hiposmia (disminución del olfato). • Alteraciones del sueño ("actuar" los sueños: hablar, llorar, reír, moverse como si caminaran). • Depresión. • Estreñimiento (evacuaciones intestinales disminuidas). 	Presencia de evidencia clásica de la enfermedad de Parkinson.

¿Cómo se trata la enfermedad de Parkinson?

El tratamiento de la enfermedad de Parkinson busca compensar la pérdida de dopamina debida a la muerte de las neuronas que la producen. Para ello se administran precursores de la dopamina (el más común de los cuales es la levodopa) que en el cerebro se convierten en dopamina; asimismo, se prescriben medicamentos que reducen la degradación de la dopamina, para aumentar sus niveles en el cerebro, y también se utilizan los agonistas dopaminérgicos, que imitan la acción de la dopamina para paliar su pérdida.

Como con todo medicamento, el tratamiento para la enfermedad puede tener efectos adversos, entre ellos: náuseas, vómitos, alucinaciones, disminución de la presión arterial y discinesias (movimientos espontáneos de una o varias partes del cuerpo). Por eso es importante que los pacientes acudan a consultas

médicas periódicas para que se les ajuste la dosis del fármaco y se minimicen los efectos adversos, o bien se indiquen otros medicamentos que los contrarresten.

Si bien aún no existe una cura para la enfermedad de Parkinson, es fundamental que las personas diagnosticadas con este padecimiento sigan puntualmente el tratamiento médico. En todo el mundo se está estudiando para entender mejor la enfermedad, con la idea de prevenirla, conocer los efectos del tratamiento en el corto y mediano plazo, ofrecer alternativas para mejorar la calidad de vida de los pacientes y –¿por qué no?– encontrar una cura.

¿De qué otras maneras ayudan los medicamentos?

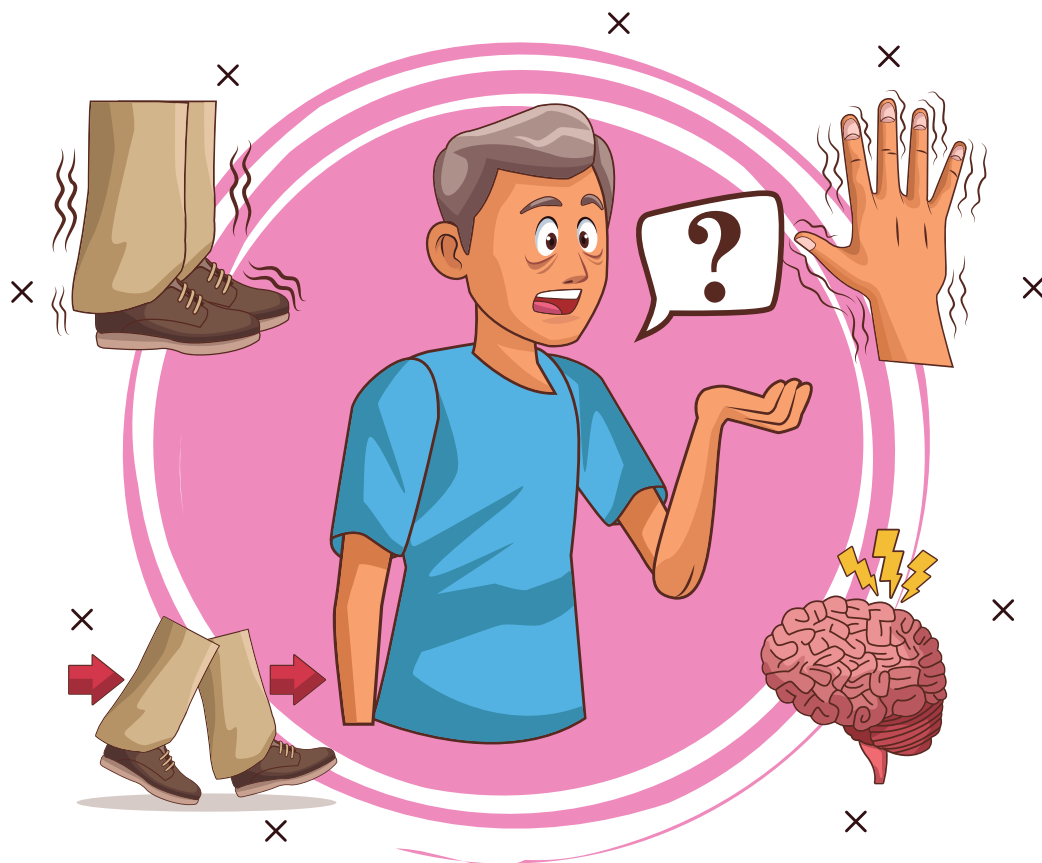
Numerosas investigaciones han averiguado la relación del sistema inmune con el origen de padecimientos neurodegenerativos como la enfermedad de

Parkinson. Un estudio dirigido por Laura Adalid Peralta y sus colaboradores en la Unidad Periférica para el Estudio de la Neuroinflamación, en el Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, en colaboración con el Instituto de Investigaciones Biomédicas de la Universidad Nacional Autónoma de México (INNN/IIB), aborda la influencia del tratamiento en el sistema inmune de las personas que sufren este padecimiento.

La respuesta inmune en los organismos vertebrados es un mecanismo muy complejo, pero para simplificar la imagen podemos describir dos tipos básicos de respuesta: la inflamatoria y la reguladora. La respuesta inflamatoria depende de un grupo de células –parecidas a un ejército de batalla– que nos defienden de cualquier ataque exterior, desde una gripe hasta enfermedades mucho más graves. La segunda respuesta depende de las células reguladoras –la segunda línea de defensa– que reducen en cantidad y actividad a las células de la respuesta inflamatoria. Ambos tipos de células mantienen el equili-

brio mientras viajan por todo el cuerpo en los vasos linfáticos. Ante una situación de daño o enfermedad (ya sea virus, bacteria, hongo o daño por trauma), las células inflamatorias aumentan su número para contrarrestar los efectos nocivos y eliminar la amenaza. Una vez controlada la agresión, las células reguladoras disminuyen el número y los efectos de las células inflamatorias; en otras palabras, ponen un alto a la inflamación para regresar al estado de equilibrio natural en que se encontraba el cuerpo. Por lo tanto, situaciones en las que exista una respuesta reguladora deficiente, o bien una respuesta inflamatoria persistente y aumentada, podrían ser dañinas para el cuerpo. En particular, se ha observado que en los trastornos neurodegenerativos (como es la enfermedad de Parkinson) existe un desequilibrio entre las células reguladoras y las células inflamatorias, lo que podría explicar el daño a las neuronas que producen dopamina.

En el INNN/IIB se investigó si el tratamiento de la enfermedad de Parkinson puede intervenir de cier-



ta manera en el funcionamiento de las células tanto del sistema inmune inflamatorio como del regulador. Para averiguarlo, se tomó sangre de pacientes con enfermedad de Parkinson y se analizaron sus células antes y un año después de comenzar el tratamiento. Los pacientes que aún no recibían medicamento presentaron altos niveles de células inflamatorias y menores cantidades de células reguladoras. Sin embargo, al año de iniciar el tratamiento, las células inflamatorias disminuyeron y las reguladoras aumentaron. Esto podría indicar que el tratamiento ayuda a recuperar la respuesta de las células reguladoras en los pacientes con enfermedad de Parkinson, para así ayudar a contrarrestar la respuesta de las células inflamatorias y reducir el daño constante a las neuronas durante la enfermedad. El estudio subraya la importancia del uso correcto del tratamiento durante la enfermedad, porque no sólo contrarresta los síntomas, sino que podría promover una respuesta en las células de la sangre que ayudaría a combatir la enfermedad y mejorar el estado del paciente.

Queda mucho por hacer

En la actualidad, Benjamín toma su medicación como le indicaron en el hospital y ha mejorado mucho su calidad de vida, aunque con secuelas, por lo que debe utilizar un bastón que le ayuda a desplazarse. Sin embargo, por desgracia, muchos pacientes en México con la enfermedad de Parkinson no siguen el tratamiento prescrito. Esto puede deberse al desinterés de los pacientes hacia su salud o por la influencia de personas poco informadas, quienes ignoran que suspender el tratamiento tiene consecuencias graves.

Si bien aún no hay cura para la enfermedad de Parkinson, es indispensable acudir a una consulta médica en cuanto se detecten los primeros síntomas, como torpeza en los movimientos y temblor, para tener un diagnóstico temprano. Además, es fundamental que las personas diagnosticadas con la enfermedad sigan puntualmente el tratamiento; aquí cabe

resaltar la importancia de respetar el horario y el número de tomas de los medicamentos. De esta forma puede mejorar la calidad de vida de los pacientes, así como de sus familiares, amistades y cuidadores.

Israel González Saavedra

Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, Unidad Periférica para el Estudio de la Neuroinflamación, Universidad Nacional Autónoma de México.
medisra135@hotmail.com

Laura Virginia Adalid Peralta

Instituto Nacional de Neurología y Neurocirugía, Unidad Periférica para el Estudio de la Neuroinflamación, Universidad Nacional Autónoma de México.
adalid.laura@yahoo.com

Los autores agradecemos al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el financiamiento al proyecto de investigación "Efecto del tratamiento con agonistas dopaminérgicos en la respuesta inmunomoduladora de pacientes con enfermedad de Parkinson" (INNN/IIB, Conacyt, SALUD-2015-1-261455); a Juan Francisco Rodríguez por la edición y revisión del manuscrito, y a Asiel Arce Sillas y Raquel Espinosa Cárdenas por colaborar en la redacción.

Referencias específicas

- Postuma, R. B. *et al.* (2015), "MDS clinical diagnostic criteria for Parkinson's disease", *Movement Disorders*, 30:1591-1601. Disponible en: <www.doi.org/10.1002/mds.26424>, consultado el 13 de noviembre de 2021.
- Schapira, A., K. Chaudhuri y P. Jenner (2017), "Non-motor features of Parkinson disease", *Nature Reviews Neuroscience*, 18:435-450. Disponible en: <www.doi.org/10.1038/nrn.2017.62>, consultado el 13 de noviembre de 2021.
- Tarakad, A. y J. Jankovic (2017), "Diagnosis and Management of Parkinson's Disease", *Seminars in Neurology*, 37(02):118-126. Disponible en: <www.doi.org/10.1055/s-0037-1601888>, consultado el 13 de noviembre de 2021.

Tomás Rivas García, Luis Guillermo Hernández Montiel y Jorge Alberto Alejandro Rosas

Inductores de defensa para activar el sistema inmune de las plantas

Las plantas cuentan con mecanismos de defensa específicos para contrarrestar el desarrollo de enfermedades. Los inductores de defensa son moléculas reconocidas por la planta que activan los mecanismos de defensa sin producir enfermedad. Estas moléculas podrían emplearse como un tratamiento alternativo para promover la disponibilidad de alimentos y el control de fitopatógenos sin requerir la aplicación de plaguicidas químicos.

¿Por qué es importante controlar las enfermedades de las plantas?

El impacto económico que ocasionan las enfermedades originadas principalmente por hongos y bacterias en las plantas es de aproximadamente 220 billones de dólares estadounidenses, lo que corresponde a casi 42% de todos los cultivos producidos anualmente alrededor del mundo (Pimentel, 2019). Las enfermedades no sólo provocan pérdidas económicas para los productores, sino también para los consumidores, ya que, de manera directa o indirecta, las plantas intervienen en la disponibilidad mundial de alimento; por ejemplo, la carne, leche y huevos que comemos habitualmente provienen de animales que se alimentaron en alguna etapa de su vida de las plantas o sus derivados.

Como cualquier ser vivo, las plantas crecen y se reproducen de manera habitual en condiciones normales; sin embargo, esto puede cambiar cuando las plantas son afectadas por fitopatógenos bióticos (un organismo vivo que las ataca) o abióticos (cuando son afectadas por variables climáticas y **edáficas**, entre otras) que provocan una enfermedad. La principal vía por la cual las plantas se pueden enfermar es por la presencia de microorganismos; destacan por su impacto negativo en la agricultura: bacterias, hongos, nematodos, virus y fitoplasmas. Estos fitopatógenos bióticos son los causantes de enfermedades infecciosas que pueden afectar desde la germinación de las semillas hasta el crecimiento y la productividad de las plantas. Algunos son tan especializados que impactan únicamente en un tipo de cultivo u órgano vegetal, en cierta etapa de crecimiento o bajo condiciones ambientales específicas.

Edáfico(a)

Relacionado con la composición física, química y biológica del suelo, condiciones que interfieren en el crecimiento y desarrollo de las plantas.



Una vez que el fitopatógeno entra en contacto directo con la planta, inicia el proceso de infección, mediante la penetración y la colonización de los tejidos; en esta primera etapa afecta a un número reducido de células vegetales. Conforme pasan los días, la enfermedad avanza y empiezan a desarrollarse los síntomas en las plantas. Dependiendo del tipo de célula, tejido u órgano enfermo serán las funciones fisiológicas que se afectarán. Si la enfermedad se localiza en la raíz de las plantas, se limitará principalmente la absorción de agua y nutrientes; si es en el follaje, disminuirá la fotosíntesis; en las flores y frutos, se comprometerá la reproducción. Estas afectaciones de los fitopatógenos disminuyen la cantidad de la cosecha y la calidad de los productos, como frutos, tubérculos, bulbos, granos y follaje, entre otros.

La mayoría de los fitopatógenos son parásitos, es decir, viven a expensas de las plantas tomando sus nutrientes. Por lo tanto, la capacidad de enfermar o no a las plantas está íntimamente relacionada con la capacidad del microorganismo para penetrar, infectar, alimentarse y reproducirse en la planta. Dependiendo de si los parásitos se alimentan de tejidos vivos o de células que ellos matan, son denominados biotrofos o necrotrofos; esta clasificación es importante para entender los mecanismos de defensa de las plantas (véase la Figura 1).

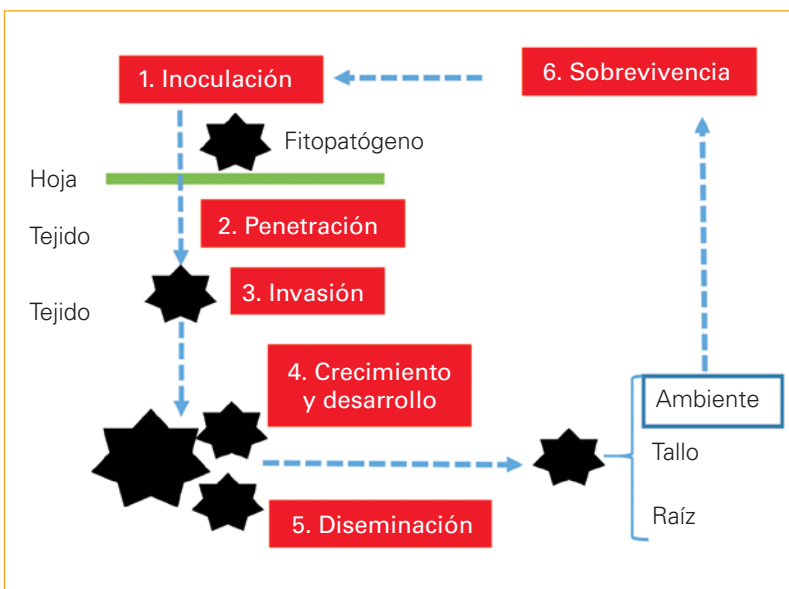


Figura 1. Etapas del desarrollo del patógeno durante la enfermedad en las plantas.

■ ■ ■ ¿Cómo se defienden las plantas contra los fitopatógenos?

La activación de los mecanismos de defensa de las plantas no siempre impedirá que el fitopatógeno se establezca. Esto dependerá de una compleja señalización a nivel molecular y fisiológico, en la cual intervienen las células vegetales y el fitopatógeno biótico, bajo la influencia de las condiciones ambientales. Una vez que el fitopatógeno está en contacto físico con la planta, intenta colonizar su superficie o penetrar sus tejidos para iniciar el proceso infeccioso. Para evitarlo, la primera línea de defensa que tienen las plantas son las barreras estructurales (ceras, cutícula, células de la epidermis) y moléculas preformadas (fenoles, taninos y ácidos grasos), cuyas funciones principales son las de contener o inhibir la entrada de los fitopatógenos. No obstante, si se logra evadir estas defensas, se desencadenará una serie de mecanismos que la planta accionará como estrategias de protección (Cook y cols., 2015).

Para que las plantas inicien su proceso de autodefensa, el cual no siempre genera resistencia, primero deberán reconocer a algunas moléculas (conocidas como inductores de defensa) presentes o secretadas por los fitopatógenos; si no logran detectarlas, pueden presentarse alteraciones estructurales o fisiológicas y, en algunos casos, la muerte celular. Existen diversos inductores de defensa que las plantas pueden reconocer, principalmente, componentes de la superficie celular, enzimas y metabolitos secundarios (véase la Tabla 1).

La inhibición de la reproducción del patógeno en la planta se va a lograr solamente si las células vegetales invadidas responden de manera hipersensitiva. Esta respuesta celular se caracteriza por la producción de especies reactivas de oxígeno (por ejemplo, superóxido $[O_2^-]$, peróxido de hidrógeno $[H_2O_2]$ y radical hidroxilo $[OH]$) que tienen como función principal iniciar un proceso conocido como muerte celular programada (véase la Figura 2) y una acción antimicrobiana directa sobre los fitopatógenos. Así, la muerte celular programada sucede cuando las células de la planta que están localizadas en la zona de infección se mueren tras recibir una señal generada al incrementarse las especies reactivas de oxígeno (Tian y cols., 2016); las células mueren para

Tabla 1. Ejemplos de moléculas inductoras de defensa en las plantas.

Inductor	Clasificación	Origen	Fitopatógeno
Glucano	Polisacárido	Pared celular	Hongo
Quitina	Polisacárido	Pared celular	Hongo
Pectina	Polisacárido	Pared celular	Hongo y bacteria
Harpin	Proteína	Metabolito	Bacteria (gram negativa)
Flagelina	Proteína	Flagelo	Bacteria (gram negativa)
Glicoproteína	Proteína	Membrana celular	Hongo y levadura
Ergosterol	Esterol	Membrana celular	Hongo
Toxina	Proteína	Metabolito	Bacteria
Poligalacturonasa	Proteína	Enzima	Hongo

tratar de detener el proceso de infección. Cabe señalar que esta respuesta por lo general no provee resistencia contra los fitopatógenos necrotróficos.

Por otro lado, si no hay respuesta de hipersensibilidad, se desencadena una cascada de señalizaciones para activar dos vías de defensa: inducida y adquirida. En el primer caso, el ácido jasmónico y el etileno tienen una función primordial en la defensa inducida de las plantas, la cual protege a la zona inicial de la infección mediante el engrosamiento de los tejidos por acumulación de lignina, callosa, suberina, entre otros, así como por la producción de metabolitos secundarios como fenoles (Rojas y cols., 2014). En el segundo caso, el ácido salicílico está presente para activar la defensa adquirida en las plantas a partir de la activación de genes relacionados con proteínas de tipo PR, como glucanasas, quitinasas, proteasas, entre otras (véase la Figura 3). La defensa adquirida es una respuesta que permanece activa después de la inducción y actúa en contra de numerosos fitopatógenos en toda la planta. La defensa adquirida es igualmente efectiva contra diferentes tipos de bacterias, hongos, nematodos, virus y fitoplasmas.

Otra respuesta involucrada en la defensa de las plantas es el *priming*, el cual es un estímulo generado por moléculas que, a pesar de que no generan enfermedad, producen un sistema de defensa parecido a la inmunidad de memoria que presentan los seres humanos. El *priming* no es una respuesta específica y hasta el momento se sabe que puede ser provocado por una gran variedad de estímulos físicos, químicos y biológicos (Mauch-Mani y cols., 2017).

¿Cuál es el tratamiento convencional de las enfermedades en las plantas?

De manera tradicional, el control de enfermedades provocadas por agentes fitopatógenos en las plantas consiste en la aplicación de plaguicidas químicos. Según el fitopatógeno que se pretenda controlar será el tipo de sustancia que se utilice; por ejemplo, existen bactericidas para controlar bacterias, fungicidas para hongos y nematocidas para nematodos, entre otros. El uso de estos productos empezó a finales de la década de 1600 en Inglaterra para el cultivo de trigo (Agrios, 2005); en esa época, los agricultores observaron que las plantas provenientes de semillas rescatadas de un barco hundido se enfermaban menos en comparación con otras semillas de diferentes procedencias. A partir de ese análisis empírico, empezaron a tratar a las semillas con salmuera (agua con una concentración superior a 5% de cloruro de sodio [NaCl]) para controlar diversos hongos.

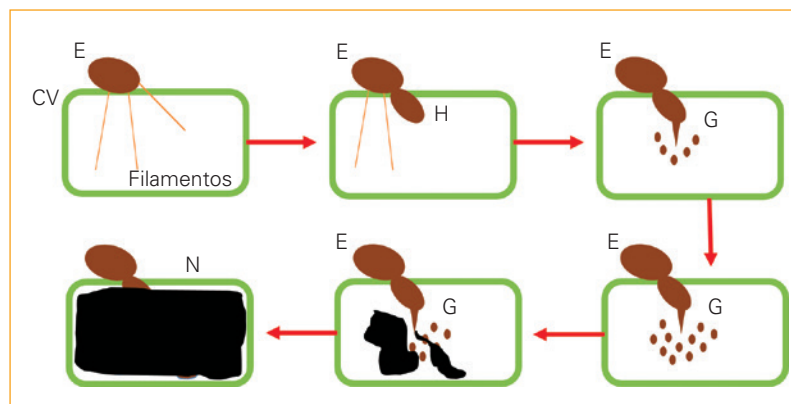


Figura 2. Muerte celular programada; E: espora, CV: célula vegetal, H: hifa, G: granulos, y N: necrosis.

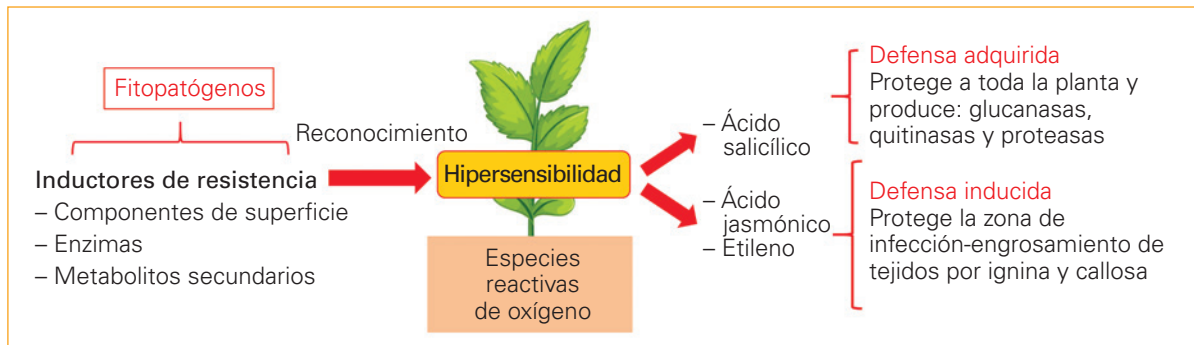


Figura 3. Reconocimiento y defensa de las plantas ante los fitopatógenos.

Posteriormente, a mediados del año 1700, el cloruro de sodio fue sustituido por sulfato de cobre (CuSO_4). A la fecha se siguen utilizando derivados del cobre como tratamiento preventivo de enfermedades en semillas y plantas (Lamichhane y cols., 2018). Sin embargo, el descubrimiento de la penicilina en 1928 por Alexander Fleming marcó el inicio de una nueva era en el uso de antimicrobianos. En 1934 se vendió el primer fungicida, de nombre Tiram (cuyo ingrediente activo es el ditiocarbamato), y de esta manera comenzó la comercialización de diversos productos químicos utilizados para el control de enfermedades en las plantas.

En un inicio se desconocía que los plaguicidas causaban daños a los seres vivos y al ambiente; por lo tanto, se aplicaban indiscriminadamente sobre diversos cultivos e incluso sobre animales y humanos. Por ejemplo, el dicloro difenil tricloroetano, mejor conocido como DDT, es uno de los compuestos químicos más tóxicos que existen y cuyas moléculas pueden permanecer por tiempos muy prolongados en el ambiente. En 1970 se hicieron las primeras investigaciones para demostrar la toxicidad generada por algunos productos químicos y en 1980 se crearon leyes para controlar el uso y la comercialización de los productos químicos en la agricultura. A partir de estas leyes, aproximadamente 90% se dejó de vender o fueron prohibidos, pues incluso muchos de ellos pierden su efecto a corto y mediano plazo (He y cols., 2016).

Hoy existe una creciente preocupación mundial por investigar y desarrollar tratamientos alternativos al uso de plaguicidas que sean igual de eficientes pero que no afecten a la salud humana, animal o ambiental. Algunas de las alternativas consisten en

la generación de plantas resistentes a ciertos tipos de fitopatógenos, el uso de microorganismos como agentes naturales de control biológico, la inducción de los mecanismos de defensa en las plantas con compuestos no tóxicos, entre otras (Sader, 2017).

■ Inductores de defensa con un uso potencial en la agricultura

Las plantas no producen anticuerpos *per se* contra los fitopatógenos (Agris, 2005), y la mayoría de sus mecanismos están inactivos hasta que se detecta alguna molécula inductora que le permite iniciar el proceso de defensa, descrito previamente como *priming* (Burketova y cols., 2015). Por lo general, los inductores de defensa no tienen un efecto directo sobre los fitopatógenos; por lo tanto, no existe una presión selectiva que pueda generar resistencia en un corto, mediano o largo plazo. Más bien se puede emplear como un tratamiento preventivo que disminuye la severidad de la enfermedad en las plantas infectadas; sin embargo, hay que considerar que al activarse el sistema de defensa se podrían comprometer otras funciones fisiológicas, como el crecimiento y desarrollo vegetal.

Existen productos químicos que han mostrado resultados relevantes para la inducción de la defensa, cuyos usos son prometedores para la agricultura. Hace tres décadas, Probenazole fue el primer inductor químico de defensa; desde 1975, se empezó a demostrar que tenía la capacidad de disminuir la severidad de las infecciones fúngicas en los cultivos de arroz. Por otra parte, el acibenzolar S metil es un compuesto químico que induce la resistencia adqui-

rida en las plantas; según estudios previos, ha disminuido la severidad de las enfermedades en plantas como tabaco, tomate, cucurbitáceas (como calabaza, melón, pepino y sandía), lechuga y manzana. Harpin es otro compuesto químico que puede inducir la activación de la vía dependiente del ácido salicílico (resistencia inducida) y la dependiente del ácido jasmónico y etileno (resistencia adquirida). Se ha reportado que este producto disminuye la severidad de algunas enfermedades en plantas como tomate, chile, pimiento, cucurbitáceas, bayas, plátano, tabaco, ornamentales, vid, cebolla, papaya, cítricos y hortalizas. Asimismo, el quitosano es un polisacárido obtenido de caparazones de crustáceos que también induce los mecanismos de defensa y además promueve el crecimiento en muchas plantas; sin embargo, a diferencia de otros inductores de defensa, el quitosano sí tiene actividad antimicrobiana directa.

Perspectivas

El reto para el futuro es producir alimentos de manera sustentable y controlar las enfermedades sin emplear productos químicos agresivos (He y cols., 2016). La aplicación de inductores de defensa puede ser un tratamiento alternativo de interés para la

ciencia, pero sobre todo para la sociedad mundial. Constantemente se descubren nuevos inductores y se profundiza en el conocimiento de la respuesta fisiológica de las plantas; será de especial relevancia demostrar su aplicación práctica en la agricultura y su factibilidad en términos energéticos y metabólicos de la resistencia de cada tipo de planta. Además, gracias a la nueva era de las tecnologías, se logrará profundizar en el conocimiento hasta niveles moleculares y genéticos, lo que permitirá optimizar la aplicación de los inductores de defensa en plantas para sustituir el uso de productos químicos a mediano plazo.

Tomás Rivas García

Universidad Autónoma Chapingo.
eltom_r@hotmail.com

Luis Guillermo Hernández Montiel

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

Jorge Alberto Alejandro Rosas

Universidad Veracruzana.
jalejandro@uv.mx

Referencias específicas

- Agrios, G. (2005), *Fitopatología*, 2.^a ed., México, Grupo Noriega.
- Burketova, L., L. Trda, P. G. Ott y O. Valentova (2015), "Bio-based resistance inducers for sustainable plant protection against pathogens", *Biotechnol. Adv.*, 33(6): 994-1004.
- Cook, D. E., C. H. Mesarich y B. P. Thomma (2015), "Understanding plant immunity as a surveillance system to detect invasion", *Annu. Rev. Phytopathol.*, 53:541-563.
- Espinoza-Escalante, F. M. (2018), "Biotecnología para la agricultura moderna", *Ciencias*, 69(4):1-6.
- Lamichhane, J. R. *et al.* (2018), "Thirteen decades of antimicrobial copper compounds applied in agriculture. A review", *Agron. Sustain. Dev.*, 38(3):28.
- He, D. C., J. S. Zhan y L. H. Xie (2016), "Problems, challenges and future of plant disease management: from an ecological point of view", *J. Integr. Agric.*, 15(4): 705-715.
- Mauch-Mani, B., I. Baccelli, E. Luna y V. Flors (2017), "Defense priming: an adaptive part of induced resistance", *Annu. Rev. Plant Biol.*, 68:485-512.
- Pimentel, D. (2019), *World Food, Pest Losses, and the Environment*, Nueva York, Taylor and Francis Group.
- Rojas, C. M., M. Senthil-Kumar, V. Tzin y K. Mysore (2014), "Regulation of primary plant metabolism during plant-pathogen interactions and its contribution to plant defense", *Front. Plant Sci.*, 5:1-17.
- Sader (2017), *Planeación Agrícola Nacional 2017-2030*, México, Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Disponible en: <<https://www.gob.mx/agricultura/acciones-y-programas/planeacion-agricola-nacional-2017-2030-126813>>, consultado el 1 de noviembre de 2019.
- Tian, S. *et al.* (2016), "Molecular aspects in pathogen-fruit interactions: virulence and resistance", *Postharvest Biol. Tec.*, 122:11-21.

Valeria Caltzontzin Rabell, Claudia Gutiérrez Antonio y Juan Fernando García Trejo

Alternativas para el aprovechamiento integral de residuos orgánicos

Los residuos orgánicos representan un problema de contaminación, ya que se generan en grandes volúmenes. Si bien pueden aprovecharse mediante diferentes procesos de conversión, el tipo de productos que se obtiene es limitado. En cambio, el uso de biorrefinerías, que incluyan el cultivo de insectos como pretratamiento, permitirá generar una amplia gama de productos de una manera integral.

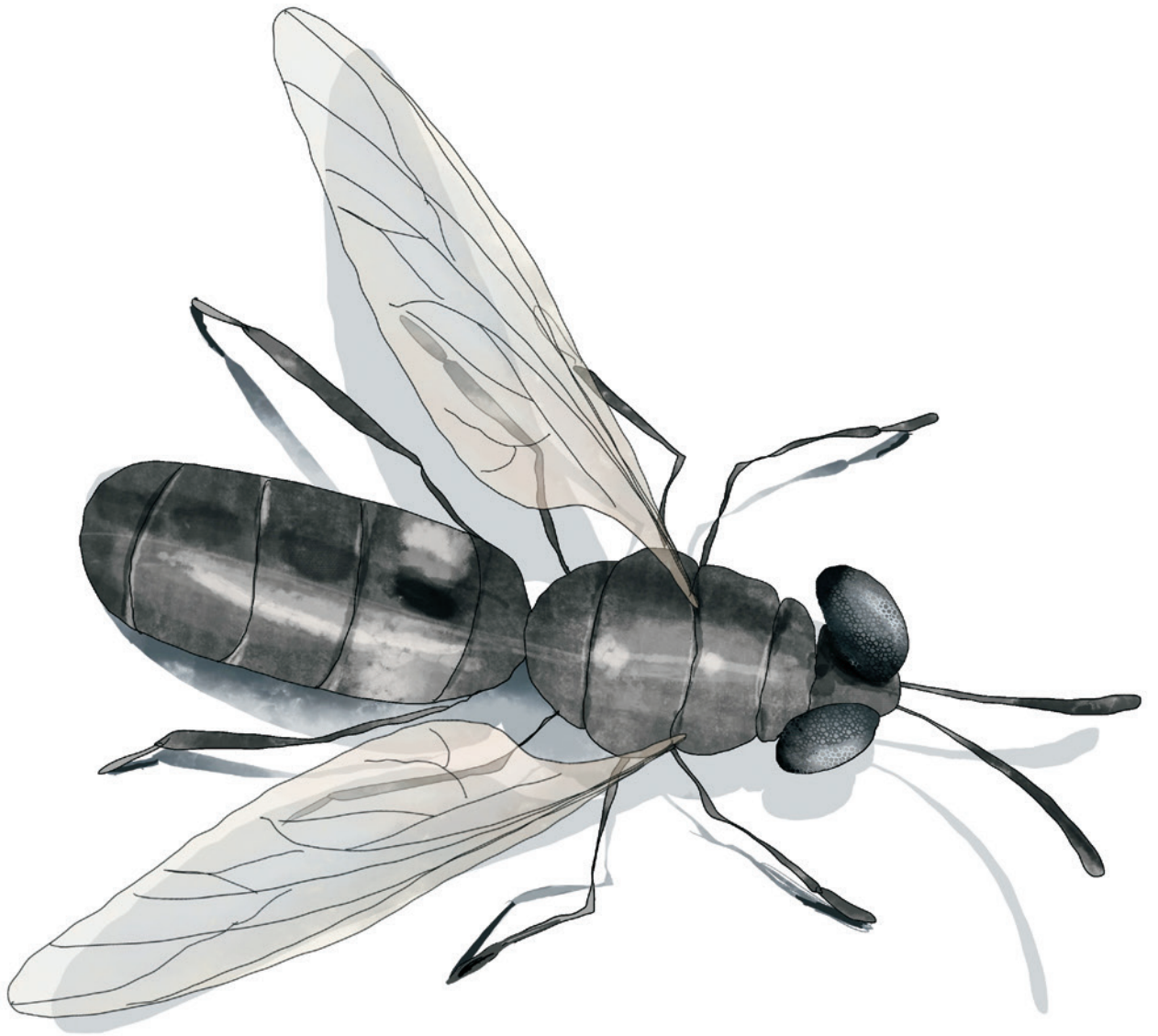
Introducción

¿Qué pasa con toda la comida que no nos comemos? No sólo en casa tiramos alimentos en mal estado o las sobras; esto también sucede en restaurantes, hoteles, hospitales y supermercados. De igual manera, existen mermas cuando se transportan los productos comestibles, ya sea porque se pudren o se dañan. En todos estos escenarios, los residuos se desechan como basura (véase la Figura 1).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), anualmente se desperdicia un tercio del total de los alimentos producidos en el mundo para el consumo humano; dicha cifra representa 1 300 millones de toneladas, cantidad equivalente a lo que consumen 3 700 millones de personas durante un año. Estos desechos alimentarios forman parte del gru-



Figura 1. Residuos de alimentos.



po de residuos orgánicos, los cuales son materiales o restos de origen vegetal o animal que son fácilmente descompuestos por microorganismos (CCA, 2017).

No obstante, los residuos orgánicos representan un problema porque, aunque existen estrategias para su tratamiento, cada vez se desechan en mayor cantidad. Según la Comisión para la Cooperación Ambiental de América del Norte, tan sólo en México se generaron 38.3 millones de toneladas de residuos orgánicos; de este total, 2.5 millones de toneladas se reutilizaron, lo que indica que casi 94% no se aprovecha para obtener nuevos productos o servicios. Desde el punto de vista económico, las pérdidas cuantificadas en dólares estadounidenses representan 680 000 millones en los países industrializados y 310 000 millones en los países en vías de desarrollo; esta estimación deriva de la generación de residuos por habitante. En América del Norte y Europa la generación de residuos por habitante oscila entre 95 y 115 kg/año, mientras que en África y Asia sólo se generan de 6 a 11 kg/año.

Adicionalmente, la generación de residuos alimenticios se traduce en pérdidas de otros recursos. Por ejemplo, imaginemos que compramos un par de manzanas; al comer una de ellas quedarán como residuos el corazón y las semillas, los cuales también requirieron, para su obtención, recursos como agua, energía, tierra y abono para crecer. Cuando estos residuos se desechan, por decir, en una bolsa, esto implica el uso de otros recursos para la elaboración de la bolsa, así como energía para transportarla al basurero. Ahora bien, si la otra manzana queda olvidada y se descompone, de nuevo se pierden recursos. En ambos casos, cuando los residuos llegan a los vertederos, se descomponen y producen gases de efecto invernadero, como dióxido de carbono y metano, que contribuyen al calentamiento global.

Por todo lo anteriormente expuesto, la comunidad científica se ha dedicado a buscar alternativas para aprovechar estos residuos mediante diferentes procesos. Así, en este artículo describimos las principales estrategias actuales para la conversión y el aprovechamiento de los residuos orgánicos, así como sus ventajas y desventajas. Por último, presentamos un esquema de biorrefinería, con el cultivo de in-

sectos para el pretratamiento, como una alternativa interesante de revalorización alineada al concepto de economía circular.

■ Estrategias para la conversión de residuos orgánicos

■ El aprovechamiento de residuos se refiere a los procesos que permiten reincorporar, por lo menos, una parte de los productos a la cadena productiva, mediante su remanufactura, rediseño, reciclado y recuperación de materiales o energía (Semarnat, 2020). La revalorización de residuos orgánicos es una estrategia muy importante para ayudar a resolver el problema de su desecho; al mismo tiempo, permite aprovechar la biomasa para la generación de nuevos recursos energéticos que posibilitarán la transición hacia fuentes renovables de energía; además, otro aspecto que debe tenerse en cuenta es la capacidad de extraer o generar productos de valor agregado a partir de dichos residuos. Para esto, existen procesos térmicos, bioquímicos y biológicos, los cuales describimos a continuación.

Los procesos térmicos se utilizan para transformar los residuos en compuestos diferentes mediante la aplicación de calor; ejemplos de estos procesos son la combustión, la pirólisis y la gasificación. En la combustión, los residuos se queman en presencia de oxígeno, por lo que se genera una flama y calor; la combustión de la biomasa puede alcanzar temperaturas de entre 220 °C y 300 °C, con lo que se libera una gran cantidad de energía (proceso exotérmico). Los productos de la combustión son carbón, dióxido de carbono, agua, cenizas y calor (Guo y cols., 2015). Por otra parte, en la pirólisis, los residuos se descomponen a temperaturas entre 500 °C y 800 °C en ausencia de aire. Los productos de la pirólisis incluyen bioaceite (mezcla de hidrocarburos y otros compuestos), biochar (carbón vegetal), biogases (monóxido de carbono y dióxido de carbono) y agua (Guo y cols., 2015). Por último, la gasificación de los residuos se lleva a cabo a temperaturas mayores de 700 °C, con un flujo de aire menor al requerido en la combustión, para obtener syngas (compuesto por hidrógeno, monóxido de carbono y dióxido de car-

bono); la principal ventaja de la gasificación es que convierte toda la biomasa en combustible sin requerir grandes cantidades de energía (Guo y cols., 2015).

Ahora bien, en los procesos bioquímicos ocurren reacciones químicas derivadas de la acción de ciertos microorganismos. Entre los procesos bioquímicos para el tratamiento de residuos orgánicos se encuentran la fermentación y la digestión anaeróbica. La fermentación consiste en convertir los azúcares simples de los residuos en combustibles, por medio de microorganismos que lo hacen en ausencia de oxígeno. De este proceso se obtiene dióxido de carbono y alcohol etílico (llamado en ocasiones bioetanol), el cual puede utilizarse como aditivo de la gasolina (Guo y cols., 2015), o bien puede tener otros usos, una vez que ha sido purificado. Por otra parte, la digestión anaeróbica consta de una serie de reacciones químicas (acidogénesis, acetogénesis, deshidrogenación y metanogénesis) llevadas a cabo por bacterias especializadas que igualmente degradan los residuos en ausencia de oxígeno. Entre los productos obtenidos se encuentran el biogás y el digestato: el biogás crudo está compuesto principalmente por dióxido de carbono y metano, el cual puede usarse como biocombustible y sustituto del gas natural (Guo y cols., 2015); mientras que el digestato, un sólido que queda después del proceso de digestión, se usa como fertilizante.

Por último, se tienen los procesos biológicos, como el composteo y el tratamiento con insectos.

Mediante el composteo, los residuos se degradan a partir de microorganismos, tanto aerobios como anaerobios (CCA, 2017). Del composteo se obtienen los humus con ácidos húmicos y fúlvicos, que son sustancias asimilables por las plantas y se utilizan como fertilizantes. Por otra parte, en el tratamiento con insectos, los residuos sirven de alimento para que crezcan las larvas, las cuales contienen proteínas y grasas (Rehman y cols., 2017). Por lo general, las larvas consumen al menos 80% de los residuos que se les dan como alimento. Dependiendo de su composición, las larvas pueden utilizarse para alimentar peces, cerdos o gallinas, ya que representan una fuente rica en proteína; también pueden extraerse las grasas para la obtención de biocombustibles; o bien pueden separarse productos de interés como la quitina, que se emplea en el tratamiento de aguas residuales.

Todos los procesos mencionados permiten convertir los residuos orgánicos en diferentes productos, y cada uno tiene ventajas y desventajas (véase la Tabla 1). En general, los procesos térmicos requieren una operación sencilla y permiten generar combustibles o energía; no obstante, los compuestos de valor agregado presentes en los residuos no se aprovechan. En contraparte, los procesos bioquímicos generan principalmente alcoholes que pueden emplearse como aditivos de gasolina o diésel; sin embargo, los costos de operación son elevados y la tasa de conversión de los residuos es baja. Por último, los procesos



Tabla 1. Ventajas y desventajas de los procesos de aprovechamiento de los residuos orgánicos (Guo y cols., 2015; MINENERGIA y cols., 2011; FAO, 2013).

Procesos	Productos	Ventajas	Desventajas
PROCESOS TÉRMICOS			
Combustión	Calor, carbón vegetal y dióxido de carbono	La tecnología es bien conocida; la biomasa se quema casi completamente.	Los compuestos de valor agregado presentes en la biomasa no se aprovechan.
Pirólisis	Biochar, bioaceite y biogases	Los productos se usan como biocombustibles o materias primas para generar otros biocombustibles.	Los equipos operan a altas temperaturas sin oxígeno; los compuestos de valor agregado no se aprovechan.
Gasificación	Syngas	Tiene una alta tasa de conversión de residuos; el syngas puede emplearse para generar otros biocombustibles.	Los equipos operan a temperaturas elevadas; los compuestos de valor agregado no se aprovechan.
PROCESOS BIOQUÍMICOS			
Fermentación	Dióxido de carbono y bioetanol	Se puede utilizar cualquier biomasa fermentable (compuesta por azúcares).	Los costos de procesamiento son elevados por los pretratamientos requeridos y la purificación de los alcoholes.
Digestión anaeróbica	Biogás y digestato	Degradan una gran variedad de residuos, con eficiencias de 90 por ciento.	Los equipos necesarios son de gran tamaño; el biogás obtenido debe purificarse.
PROCESOS BIOLÓGICOS			
Composteo	Humus con ácidos húmicos y fúlvicos	Tecnología sencilla y de fácil manejo; baja inversión que requiere poco espacio.	Requiere una temperatura mínima diaria controlada; tiene un bajo contenido de nitrógeno respecto de los fertilizantes.
Tratamiento con insectos	Biomasa que contiene proteínas, grasas y carbohidratos	Los residuos no requieren pretratamientos; la biomasa generada permite obtener biocombustibles, productos de valor agregado y energía.	Tecnología que aún está en estudio; en especial, para su escalamiento a nivel industrial.

biológicos tienen altos niveles de conversión y permiten obtener biomasa, la cual puede transformarse en diferentes productos.

A partir de la conversión de residuos orgánicos mediante estos procesos es posible obtener productos de valor agregado, biocombustibles y bioenergía; sin embargo, ninguno permite obtenerlos todos a la vez. Si se pudieran convertir los residuos en todos estos productos, se mejoraría la rentabilidad de los procesos de conversión; en este contexto, las biorrefinerías son una estrategia de procesamiento integral, la cual presentamos a continuación.

■ ■ ■ **Biorrefinerías de residuos orgánicos**

■ En una biorrefinería se transforma la biomasa (residuos orgánicos) en múltiples productos de valor agregado, biocombustibles y bioenergía, por medio

de diversos procesos de conversión (véase la Figura 2); este concepto de procesamiento es análogo a la refinería de petróleo, donde se obtienen múltiples productos (gasolina, diésel y gas natural) a partir de una única materia prima (petróleo).

Para clarificar la diferencia entre una biorrefinería y los procesos de conversión individuales descritos arriba, imaginemos que tenemos como residuo una mazorca de maíz en proceso de descomposición. Si este residuo se quema (combustión), se convierte en energía calorífica, gases de combustión y cenizas; pero si se gasifica, entonces se puede obtener syngas; o bien el residuo puede fermentarse para obtener alcohol etílico y dióxido de carbono. Es decir, a pesar de ser el mismo residuo, los productos difieren dependiendo del proceso de conversión empleado, y no es posible obtener productos de valor agregado, biocombustibles o bioenergía al mismo tiempo con un

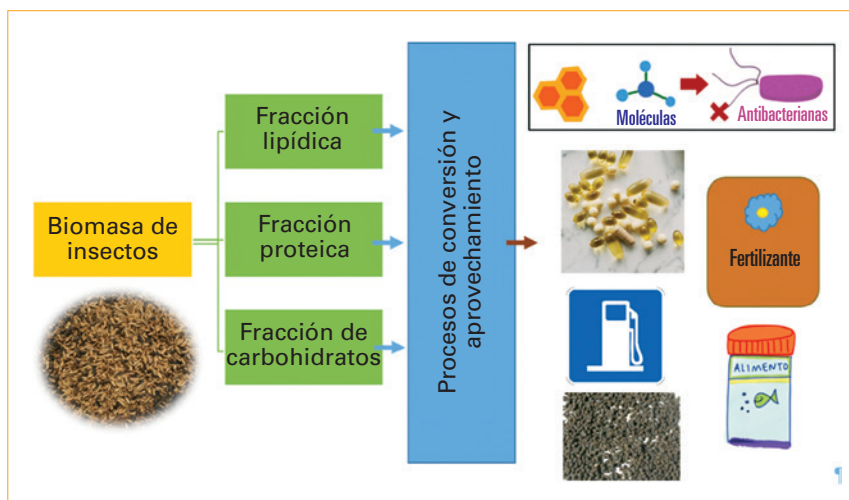


Figura 2. Esquema de una biorrefinería.

sólo proceso. En contraparte, en una biorrefinería, dicho residuo sería fraccionado en granos de maíz, hojas y olote de la mazorca. Las hojas y los olotes podrían quemarse (combustión) para generar energía calorífica, mientras que de los granos de maíz se podrían extraer compuestos antioxidantes (benéficos para la salud), y posteriormente serían fermentados para obtener alcohol etílico y dióxido de carbono. De esta manera, la conversión del residuo mediante una biorrefinería permite generar productos de valor agregado (antioxidantes), biocombustibles (bioetanol) y energía calorífica en el mismo esquema de procesamiento. En ello radica la importancia de las biorrefinerías como estrategia integral de revalorización de los residuos.

El concepto de procesamiento mediante un esquema de biorrefinería se ha propuesto para algunas especies cultivables, como la *Jatropha curcas*. Sin embargo, la conversión de los residuos orgánicos ha cobrado mayor relevancia para solucionar el problema de contaminación asociado con la acumulación de grandes volúmenes, por lo que se han implementado biorrefinerías para la conversión de residuos alimentarios, así como para el procesamiento del mango y el agave; en estas biorrefinerías se han obtenido biocombustibles, fenoles, fertilizantes, pectinas, entre otros productos (Arora y cols., 2018; Díaz-Jiménez y cols., 2019). No obstante, en estas biorrefinerías se emplean tecnologías con bajas eficiencias, como en el caso de la fermentación, y con altos consumos de

energía, como en la pirólisis. Si bien estas biorrefinerías posibilitan la obtención de productos de valor agregado, biocombustibles y energía, su rentabilidad financiera podría mejorar con el uso de pretratamientos biológicos, como el cultivo de insectos, ya que las eficiencias de conversión son muy altas. En particular, el cultivo de la mosca soldado (*Hermetia illucens*) ha ganado la atención de la comunidad científica por su capacidad para degradar una amplia variedad de residuos.

La mosca soldado es más grande que la mosca común, y sus larvas llegan a pesar 0.2 g (véase la Figura 3). Esta especie habita en regiones tropicales y subtropicales; por ello, su cultivo requiere una temperatura de 24 °C a 30 °C y una humedad entre 60%

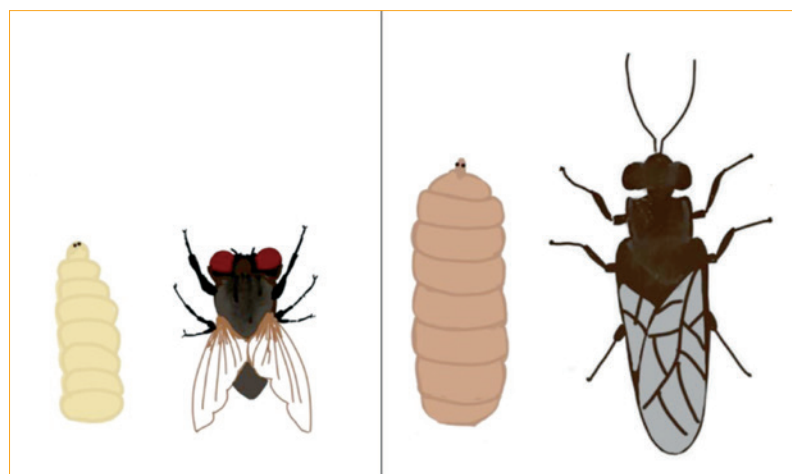


Figura 3. Larva y adulto de la mosca común, *Musca domestica* (izquierda), y mosca soldado, *Hermetia illucens* (derecha).



y 90%. Del cultivo de este insecto se emplean las larvas, ya que contienen gran cantidad de proteínas (35%) y grasas (30%); las proteínas pueden usarse para elaborar alimento para peces y gallinas, aunque a la fecha no existen estudios sobre el impacto en la salud humana por el consumo de pescado o pollo con este tipo de alimentación; por otra parte, con las grasas se puede producir biodiésel o bioturbosina. Entre las ventajas de la mosca soldado destaca que su cultivo no requiere tecnología especial y permite reducir los residuos hasta 80%. Además, se ha observado que las larvas inactivan algunas bacterias transmisoras de enfermedades, como *Salmonella spp.*, y el residuo que queda después de la degradación puede ser utilizado como composta; este residuo se separa manualmente de las larvas. Por todo lo anterior, es deseable que las biorrefinerías utilicen el cultivo de insectos como pretratamiento para la conversión de residuos.

Cabe añadir que el uso de estas biorrefinerías genera beneficios ambientales y económicos, y está alineado al concepto de economía circular. En la actualidad, el modelo de la economía es lineal, lo que implica la obtención de la materia prima, la creación de los productos y el consumo de éstos, para finalmente terminar con el desecho de los residuos. Aunque este modelo ha sido viable, actualmente ya no es sostenible debido a la abundante generación de residuos, el uso intensivo de recursos no renovables para producir energía, y las grandes cantidades de emisiones de gases de efecto invernadero. Por ello, se propone un modelo de economía

circular (véase la Figura 4) en el cual se evite el uso exclusivo de recursos naturales como materia prima y puedan reutilizarse los residuos de manera más eficiente. ¿Cómo funciona esto? Así como en el ciclo del agua y los nutrientes, algunos desechos de una fase se convierten en los recursos de la siguiente, la economía circular propone usar los residuos como materia prima para generar otros productos; de esta manera se crea un círculo. Un estudio realizado en siete naciones europeas mostró que el cambio de una economía lineal a una circular puede reducir las emisiones de gases de efecto invernadero hasta 70%, además de generar empleos, mejorar la competitividad y disminuir la cantidad de residuos, así como el uso de recursos no renovables (Stahel, 2016). En el procesamiento de los residuos mediante una biorrefinería, los subproductos de un proceso

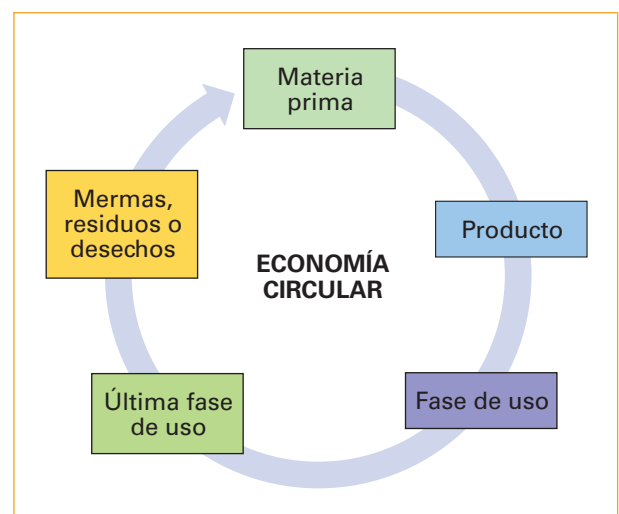


Figura 4. Diagrama de una economía circular.

pueden emplearse en otro; esto ayuda a minimizar los residuos y los costos de producción, así como el impacto ambiental.

■ Conclusión

■ Los residuos de alimentos se generan en grandes cantidades, por lo que se requieren procesos para su aprovechamiento que sean eficientes, de bajo costo y amigables con el ambiente. En este contexto, las biorrefinerías son una alternativa promisoría para la conversión de residuos, dado que posibilitan la generación de productos de alto valor agregado, biocombustibles y bioenergía, en el mismo esquema de procesamiento. En aras de que las biorrefinerías sean rentables, el pretratamiento con insectos, en especial con la mosca soldado, resulta altamente eficiente para la generación de biomasa que puede convertirse en una amplia gama de productos. Por ello, es necesario enfocar los esfuerzos de la investigación para la conversión de residuos mediante biorrefinerías que incluyan el cultivo de insectos, con lo cual se impulsará el establecimiento de una economía circular que aporte beneficios económicos y ambientales a la sociedad.

Valeria Caltzontzin Rabell

Universidad Autónoma de Querétaro.
valeria.caltzontzinrabell@gmail.com

Claudia Gutiérrez Antonio

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

Juan Fernando García Trejo

Universidad Autónoma de Querétaro.
juanfernando77@gmail.com

Referencias específicas

- Arora, A. *et al.* (2018), "Process design and techno-economic analysis of an integrated mango processing waste biorefinery", *Industrial Crops and Products*, 116:24-34.
- CCA (2017), *Caracterización y gestión de los residuos orgánicos en América del Norte, informe sintético*, Montreal, Comisión para la Cooperación Ambiental.
- Díaz-Jiménez, L. *et al.* (2019), "Conceptualization of a biorefinery for guishe revalorization", *Industrial Crops & Products*, 138:111441.
- FAO (2011), *Global food losses and food waste – Extent, causes and prevention*, Roma, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-i2697e.pdf>>, consultado el 4 de mayo de 2020.
- FAO (2013), *Manual de compostaje del agricultor. Experiencias en América Latina*, Santiago de Chile, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-i3388s.pdf>>, consultado el 28 de febrero de 2020.
- Guo, M. *et al.* (2015), "Bioenergy and biofuels: History, status, and perspective", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42:712-725.
- MINENERGIA, PNUD, FAO y GEF (2011), *Manual de biogás*, Santiago de Chile, Ministerio de Energía/Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo/Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura/Global Environment Facility. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>>, consultado el 25 de febrero de 2020.
- Rehman, K. *et al.* (2017), "Conversion of mixtures of dairy manure and soybean curd residue by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.)", *Journal of Cleaner Production*, 154:366-373.
- Semarnat (2020), "Glosario", *Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales*. Disponible en: <http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D3_GLOS_RSM&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce>, consultado el 28 de febrero de 2020.
- Stahel, W. R. (2016), "Circular economy", *Nature*, 531: 435-438.

De actualidad

Desde las redes

Noticias de la AMC



Nora A. Fierro



Las **variantes del SARS-CoV-2**: una preocupación más por la pandemia de COVID-19

Cambia el rumbo el caminante
aunque esto le cause daño
y así como todo cambia
que yo cambie no extraño...

Todo cambia, JULIO NUMHAUSER

El diseño del vestuario del SARS-CoV-2 y, en general, de toda la maquinaria que le permite infectar a las células y propagarse se encuentra en su genoma. El copiado continuo que resulta al pasar de una célula a otra y de una persona a otra promueve la incorporación de errores, los cuales pueden producir mutaciones. Esto da origen a nuevas variantes del virus original que pueden aumentar su propagación.

Introducción

Hemos vivido ya dos años con el virus SARS-CoV-2 en el mundo. A medida que ha infectado a millones de personas, se ha multiplicado miles de millones de veces a partir de copias del virus original. Esta multiplicación constante resulta en numerosas mutaciones del virus que inicialmente fue identificado en China.

Al hablar de mutaciones, no debemos olvidar que son el origen del proceso evolutivo y que éste a su vez dicta la diversidad de la vida. Los virus son extraordinarios, cambian tan rápidamente que podemos ser espectadores de su evolución como resultado de la incorporación de mutaciones en su genoma, las cuales dan lugar a las denominadas variantes. La probabilidad de incorporación de mutaciones y la selección de las variantes mejor adaptadas puede originar una propagación más eficiente de los virus. En su mayoría las mutaciones no tienen un impacto importante sobre la biología del virus, es decir, no todas afectan la tasa de transmisión o la patología asociada a la infección; sin embargo, hay algunas mutaciones que dan origen a variantes del SARS-CoV-2 que se denominan de interés, que destacan en términos epidemiológicos (por ejemplo, cuando comienzan a ser comunes entre la

población). Por otra parte, el estudio de parámetros como los cambios en la tasa de transmisión del virus, gravedad de la enfermedad que ocasiona, dificultades para la detección del patógeno y alteraciones en la susceptibilidad a vacunas o fármacos desarrollados en su contra, permite definir si una variante es de preocupación para la salud.

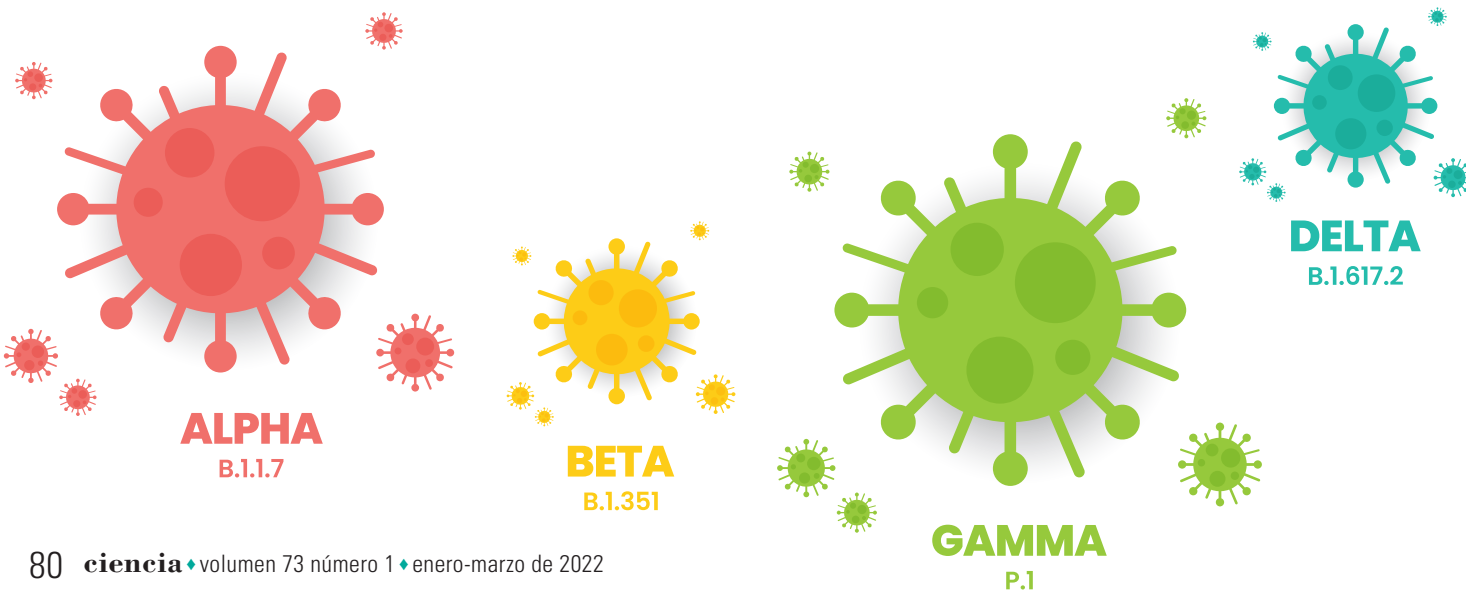
En el escenario de la pandemia por COVID-19, las vacunas disponibles fueron diseñadas contra el SARS-CoV-2 original, en su mayoría, a partir de regiones presentes en la superficie del virus que le permiten interactuar con la célula que infecta. Estas vacunas tienen como propósito prevenir el desarrollo de formas graves de la infección, pero aún nos encontramos estudiando su eficacia contra las nuevas variantes del virus que circulan en el mundo. Es importante destacar que cuando hablamos de disminución en la eficacia de las vacunas como resultado de la generación de variantes, esto no significa que se verá reducida por completo, pero podría, por ejemplo, resultar en una disminución de entre 5% y 10% con relación a la eficacia original, y así sucesivamente en caso de la incorporación de más variaciones en el genoma del virus.

Adicionalmente, los procesos celulares que rigen a la infección y a la respuesta inmune son relevantes para la generación de nuevas variantes. De este modo, las mutaciones del virus relacionadas con dichos procesos delimitarán el desarrollo de la pandemia. Por lo anterior, es imprescindible mantener un escrutinio constante de los virus circulantes en

el mundo mediante herramientas como la secuenciación, que permiten fotografiar el genoma del SARS-CoV-2. De esta forma podremos estudiar los cambios del virus con el paso del tiempo e –idealmente– anticipar cómo estos cambios afectarán el desarrollo de la infección.

¿Cómo infecta el SARS-CoV-2 a las células?

Los virus son en esencia material genético que se almacena en moléculas de ácido ribonucleico (ARN) o ácido desoxirribonucleico (ADN). El SARS-CoV-2 es un virus envuelto que consiste en una molécula de ARN que almacena toda la información en un código de cerca de 29 903 letras que constituye su genoma. Al comenzar la infección, se usa la maquinaria celular para iniciar el copiado del genoma del virus; la incorporación de algún cambio en la lectura del código original constituye una mutación. No obstante, el SARS-CoV-2 posee un componente que le permite corregir errores en su sistema de copiado para reducir la tasa de mutaciones; si se le compara con otros virus, como el causante de sarampión o el de hepatitis C, por ejemplo, el SARS-CoV-2 cambia mucho menos durante su proceso de multiplicación. Una vez que el genoma viral es leído en el interior de la célula infectada se producen los componentes que conforman al virus. Cuando estos componentes se han fabricado en la célula, las nuevas partículas se ensamblan y están listas para migrar con el objetivo de infectar a otras células.



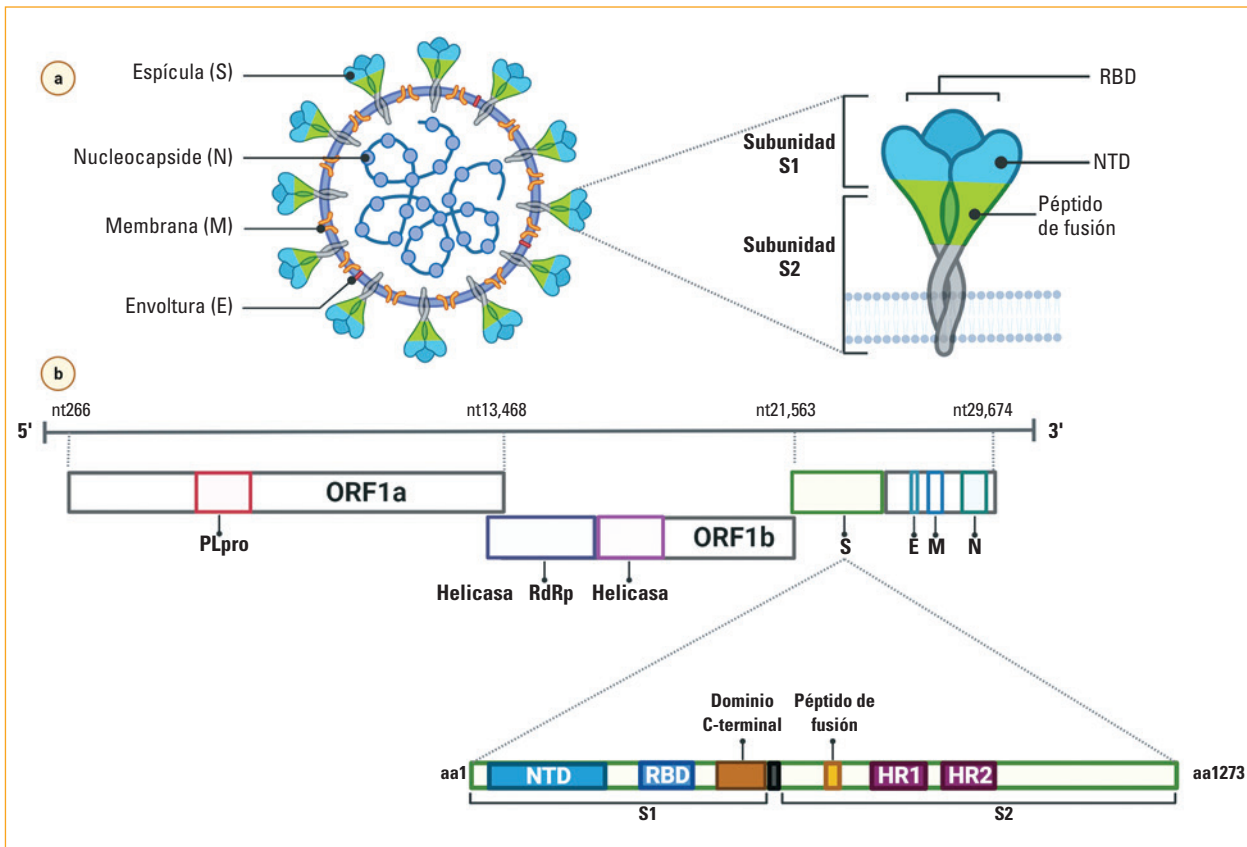


Figura 1. Estructura y genoma del SARS-CoV-2. A) Virus envuelto por una bicapa de lípidos que contiene al genoma de ARN, el cual interacciona con nucleoproteínas de la nucleocápside. Se ilustran las proteínas de membrana, de envoltura y las proteínas espícula (S); estas últimas se encuentran embebidas en la membrana y sobresalen de ésta; B) el RBD se localiza en la región carboxi terminal del dominio S1 de la proteína S y se une directamente con el receptor ACE-2 en la célula huésped; mientras que el dominio S2 contiene al péptido de fusión. Una vez liberados los dominios S1 y S2, se induce un cambio conformacional que promueve la fusión entre la membrana del virus y la membrana de la célula huésped.

La lectura del genoma del SARS-CoV-2 da lugar a un total de 25 componentes o proteínas que no forman parte de su estructura y otras cuatro proteínas estructurales: la de membrana (M), la de la envoltura (E), la nucleoproteína (N) y la proteína espícula (S, que proviene de *spike* en inglés) (véase la Figura 1a). La entrada del SARS-CoV-2 a las células humanas comienza con la unión de la proteína S del virus al receptor celular. Después, diferentes proteínas presentes en la célula, como la furina, la proteasa transmembrana de serina 2 (TMPRSS2) y la cathepsina-L, son necesarias para efectuar pasos de procesamiento que conducen a la maduración de la proteína S. En particular, la furina y la TMPRSS2 llevan a cabo cortes que permiten que la proteína S del virus y la célula se aproximen, de modo que la partícula viral y la membrana celular se fusionen y se logre la internalización del virus a la célula. Además de esta vía

de entrada, se ha descrito la internalización del virus en vesículas; en este caso, la cathepsina-L procesa a la proteína S del virus para permitir la liberación del virus en el interior de la célula.

La proteína espícula (S) y la entrada del SARS-CoV-2

Es claro que la proteína S del SARS-CoV-2 reviste especial importancia, puesto que desempeña varias funciones esenciales para el virus. Por una parte, es la proteína que sobresale de la superficie de la partícula viral y, por lo tanto, es responsable de las interacciones iniciales con la célula. Además, promueve la fusión entre la membrana del virus y la membrana celular. Finalmente, las características estructurales de esta proteína la hacen sumamente atractiva para la respuesta inmune que se activa como resultado de la infección.

En la superficie del virus, la proteína S forma un complejo de tres monómeros que interaccionan

entre sí formando lo que se denomina un complejo homo-trimérico. Cada monómero está constituido por una sola cadena que se divide en dos unidades o subdominios: el subdominio S1 y el subdominio S2. El dominio de unión al receptor (RBD; *receptor binding domain*) se localiza en la región carboxi terminal del dominio S; ésta es la región más variable o propensa a sufrir mutaciones. Dicha variabilidad le otorga al virus la capacidad de adaptarse al receptor celular y, por lo tanto, la posibilidad de infectar a diferentes organismos (véase la Figura 1b). A diferencia del S1, el subdominio S2 es altamente conservado (poco variable) y es donde se localiza la maquinaria que conduce a la fusión del virus con la membrana celular.

La proteína S cuenta con sitios susceptibles a sufrir cortes que resultan en la liberación (separación) de las subunidades S1 y S2; de esta forma, la región responsable de la fusión entre membranas queda expuesta y puede anclarse a la membrana de la célula. Por último, las membranas viral y celular se acercan y se fusionan. Entonces, la introducción de mutaciones que alteren la liberación de los dominios S1 y S2 modificará la capacidad del SARS-CoV-2 para fusionarse con la célula. Además, cada uno de los monó-

meros de la proteína S es susceptible a tener cambios en su conformación, de tal forma que el RBD puede direccionarse para quedar más o menos expuesto y así interactuar de forma diferencial con su receptor. Por ello, las mutaciones que incidan en la conformación del RBD, así como aquellas relacionadas a la fusión del virus, modularán la multiplicación viral al alterar el proceso infeccioso.

La experiencia previa a partir del estudio de otros coronavirus permitió confirmar que el dominio de unión RBD localizado en la subunidad S1 de la proteína S del SARS-CoV-2 se une a una proteína llamada enzima convertidora de angiotensina 2 (ACE-2), la cual se encuentra al exterior de la mayoría de las células de la garganta y los pulmones humanos, además de estar presente en células del intestino, riñón, neuronas, páncreas y corazón. Es por ello que el virus puede potencialmente infectar una gran variedad de tejidos. ACE-2 también es la puerta de entrada para el SARS-CoV, causante del síndrome respiratorio agudo severo (SARS), pero comparado con éste, el SARS-CoV-2 forma una unión a ACE-2 entre dos y cuatro veces más fuerte como resultado de cambios en su RBD que estabilizan sus puntos de unión.



Una entrada dulce del virus... pero no tanto

Una característica común de los coronavirus es que se visten de dulce, es decir, están cubiertos de una capa de moléculas de azúcar denominadas glicanos. La proteína S que sobresale del SARS-CoV-2 está envuelta de glicanos. Esta cubierta le permite al virus camuflarse, de modo que no es reconocido eficientemente por las células del sistema inmune, cuya función principal es detectar y eliminar a los agentes extraños al organismo.

La reconstrucción de la estructura de la proteína S, a partir del análisis computacional de datos estructurales y genéticos, permitió identificar una pequeña región que pareciera estar “desnuda” y que se distingue así del resto de la proteína por no poseer glicanos. El análisis de estos datos reveló que esta región corresponde al RBD; además, los resultados experimentales que coinciden con modelos computacionales indican que el RBD se sostiene por dos glicanos que le son esenciales: cuando estos glicanos son eliminados, el virus deja de unirse eficientemente a ACE-2 y, por lo tanto, la infección se reduce. Esta característica constituye una evidencia de que los cambios sutiles en el genoma del virus como consecuencia de las mutaciones y la generación de variantes podrían promover una interacción más eficiente entre la proteína S y sus receptores en las células humanas, lo que en consecuencia podría resultar en una mayor tasa de transmisión del virus o en diferencias en la patogénesis relacionada a la infección. Por lo tanto, conocer la secuencia genómica de los virus circulantes nos permitirá comprender los detalles y saber por qué hay variantes –como la Delta– que son más transmisibles.

Sistema inmune: nuestra defensa contra el SARS-CoV-2

En la batalla entre el SARS-CoV-2 y la humanidad, el ejército más poderoso proviene de nuestro propio organismo. El reconocimiento de patrones extraños como resultado de la infección por el virus activa a la respuesta inmune, que a su vez controla una exquisita maquinaria compuesta por dos vertientes principales: 1) la respuesta inmune humoral, que

involucra la producción de anticuerpos dirigidos contra el virus, y 2) la respuesta inmune celular, que brindará protección mediante diversos intermediarios producidos por las células inmunes; en esencia, estos intermediarios promoverán la eliminación de las partículas infecciosas y regularán los procesos inflamatorios activados.

Recuadro 1. Vigilancia de las variantes en México

Durante la pandemia por COVID-19 se estableció el Consorcio Mexicano de Vigilancia Genómica (CoViGen-Mex), conformado por instituciones gubernamentales y académicas. Uno de sus objetivos centrales es informar oportunamente sobre la circulación en México de variantes virales con potencial de afectar la transmisión o virulencia del SARS-CoV-2, así como de alterar su susceptibilidad a la respuesta inmune inducida por infecciones naturales o por las vacunas, a la acción de los fármacos disponibles contra el virus y a la sensibilidad a los métodos diagnósticos.

Una iniciativa del CoViGen-Mex fue la creación del sitio informático *MexCoV2*, diseñado para concentrar y analizar la diversidad genómica de las variantes del SARS-CoV-2 que circulan en el país. Al 10 de noviembre de 2021 se reportan en total 35 149 virus secuenciados en México (11 260 secuenciados por CoViGen-Mex).



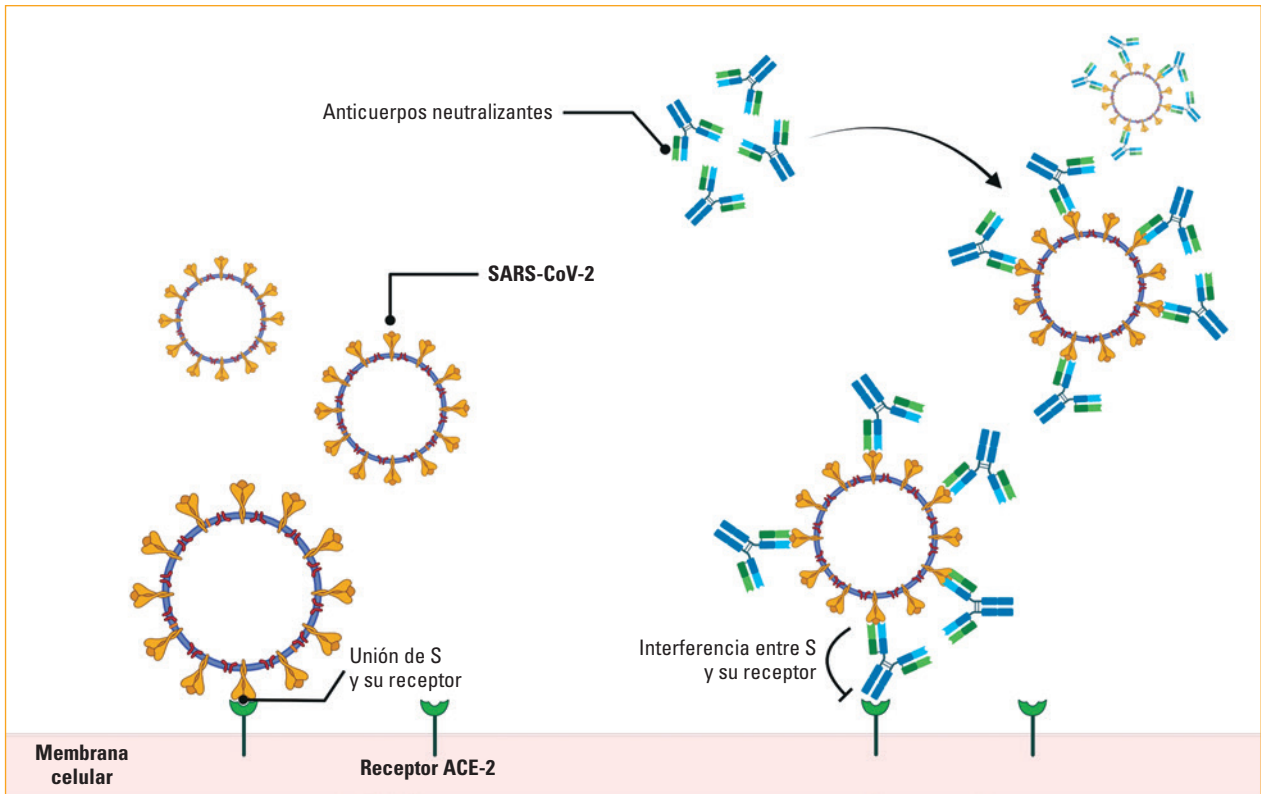


Figura 2. Inmunidad mediada por la producción de anticuerpos neutralizantes. Se ilustra el efecto de la unión de anticuerpos neutralizantes a la proteína S como resultado de la infección por el virus o por vacunación basada en esta región. La unión de estos anticuerpos al virus interferirá con su unión al receptor celular.

Un mecanismo inmunitario relevante para entender contra los virus es la producción de los denominados anticuerpos neutralizantes, los cuales, al funcionar de forma específica con aquellas regiones de la partícula viral que interactúan con los receptores celulares, bloquean o neutralizan la interacción inicial y, por ende, evitan el desarrollo de la infección y la propagación del virus (véase la Figura 2). Numerosos estudios han evidenciado que la proteína S es el principal blanco de los anticuerpos neutralizantes presentes en la sangre después de una infección natural con el SARS-CoV-2, o bien tras la vacunación. Otro mecanismo crucial para la eliminación de los virus es la activación de células inmunes y la subsecuente producción de una proteína denominada interferón. Finalmente, la defensa otorgada por el sistema inmune dejará en cada persona infectada o vacunada una “memoria” del suceso, así como protección contra subsecuentes infecciones con el mismo virus.

Como todos los virus, el SARS-CoV-2 se adapta para evadir la respuesta inmune y así continuar su

propagación. Esta adaptación requiere de cambios en su estructura promovidos por las mutaciones. Un ejemplo son aquellos cambios que le permiten al SARS-CoV-2 esconderse del reconocimiento por parte de los anticuerpos neutralizantes. Por ello, la selección de este tipo de variantes reviste una dificultad para el control de la pandemia.

Factores que influyen en la aparición de variantes virales

Recapitulando, el factor principal que influye en la aparición de nuevas variantes virales es la inherente capacidad de mutación de los virus. Por una parte, está la denominada deriva génica que, al igual que la selección natural, introduce cambios aleatorios en todos los organismos y promueve la diversidad genética; los virus no son la excepción. Además, debemos considerar la presión que el huésped —en este caso el cuerpo humano— ejerce para promover la selección de nuevas variantes. En este sentido, la expresión de

receptores celulares y la respuesta inmune ejercen una presión de selección. Tales factores a su vez pueden promover la transmisión aumentada del virus, que por sí sola representará un aspecto adicional que influirá en la aparición de variantes.

El comportamiento social también es determinante para la variabilidad de un virus y su distribución en el mundo. Un ejemplo claro fue el Kumbh Mela, la fiesta religiosa hindú que se celebra en las orillas del río Ganges, donde en abril de 2021 se reunieron alrededor de nueve millones de personas (entre feligreses y turistas) sin tomar las medidas de distanciamiento físico e higiene recomendadas para evitar contagios por el SARS-CoV-2. La culminación de la celebración, enmarcada por baños rituales masivos, resultó en un acelerado aumento de casos de COVID-19 y muertes en la India entre abril y mayo de 2021. Esta fiesta, considerada como uno de los eventos de supercontagio más importantes durante la pandemia, tuvo impacto a escala mundial, pues una gran parte de los participantes regresaría después a sus hogares en diferentes países trayendo consigo una nueva variante del virus.

■ La preocupación por las variantes del SARS-CoV-2

■ A medida que el tiempo transcurría, se fue identificando el surgimiento de mutaciones en el SARS-CoV-2, las cuales terminaron consolidándose como variantes del virus. Inicialmente, los medios de comunicación e incluso los informes científicos se refirieron a estas variantes según el lugar donde se describieron o identificaron por primera vez. Por ejemplo, la primera variante, identificada en el Reino Unido, fue de gran interés porque mostró un aumento en la tasa de transmisión del virus.

Los brotes de infecciones virales en los últimos años han promovido iniciativas encaminadas a contar con acceso abierto a sus datos genómicos. Tal es el caso de la iniciativa de ciencia global llamada GISAID (*Global Initiative on Sharing All Influenza Data*), establecida como resultado de los brotes de influenza aviar en 2006 y que durante la pandemia por COVID-19 ha facilitado la vigilancia en tiempo real para llevar un control de la aparición de nuevas variantes

del SARS-CoV-2. Ésta y otras bases de datos, incluidas *Pango* y *Nextrain*, han establecido una nomenclatura específica para identificar a las variantes, la cual, a la fecha, es la nomenclatura empleada por la comunidad científica. La Organización Mundial de la Salud (OMS) convocó a estas instancias para que, en conjunto con un grupo de especialistas en nomenclatura microbiana, recomendaran el uso de las letras del alfabeto griego para nombrar a las variantes del SARS-CoV-2 y así evitar relacionar su distribución con zonas geográficas específicas, además de facilitar su pronunciación en diferentes idiomas.

Debido a la evolución continua del virus, las definiciones funcionales para la clasificación de las variantes se modifican de forma periódica, de modo que es posible reasignar variantes como de interés y variantes de preocupación en tanto cumplan con los criterios establecidos (véase la Tabla 1). Actualmente hay una lista de variantes de preocupación que están implicadas en el aumento de la propagación del virus. Las variantes Alfa, Beta, Gamma y Delta se han vuelto las más comunes entre la población humana, y la Delta ha mostrado la mayor tasa de transmisión, por lo que las olas pandémicas recientes en todo el mundo se asocian esencialmente a esta variante (véase la Figura 3). Adicionalmente, se han identificado variantes de interés en diferentes países.

Según los datos publicados en revistas científicas reconocidas, miles de secuencias del genoma del SARS-CoV-2 correspondientes a diferentes zonas geográficas se han compartido por medio de GISAID. Esto es un fiel reflejo del incansable trabajo científico que se ha desarrollado en el mundo para controlar la pandemia. Lamentablemente, el rezago económico

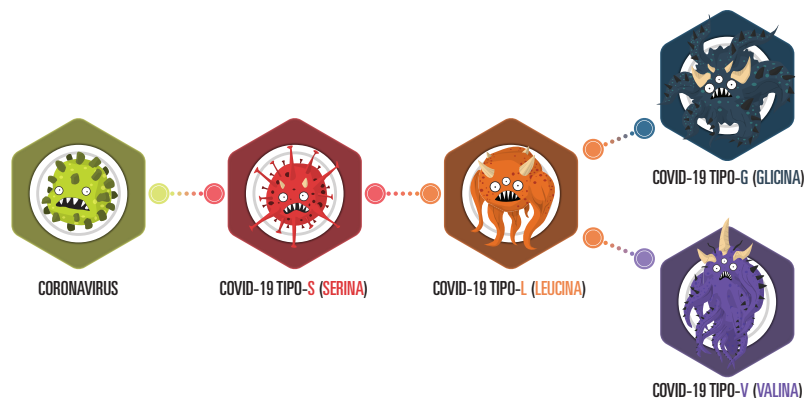


Tabla 1. Variantes de interés y de preocupación descritas en el transcurso de la pandemia.

Nombre OMS	Nomenclatura Pango	Nomenclatura GISAID	Nomenclatura Nextstrain	Aislada por primera vez (fecha de designación)
Alfa*	B.1.1.7	GRY (GR/501Y.V1)	20I/S:501Y.V1	Reino Unido (diciembre, 2020)
Beta*	B.1.351	GH/501Y.V2	20H/S:501Y.V2	Sudáfrica (diciembre, 2020)
Gamma*	P.1	GR/501Y.V3	20J/S:501Y.V3	Brasil (enero, 2021)
Delta*	B.1.617.2	G/452R.V3	21A/S:478K	India (mayo, 2021)
Epsilon	B.1.427/ B.1.429	GH/452R.V1	20C/S.452R	Estados Unidos de América
Zeta	P.2	GR	20B/S.484K	Brasil
Eta	B.1.525	G/484K.V3	20A/S484K	Varios países
Theta	P.3	GR	20B/S:265C	Filipinas
Iota	B.1.526	GH	20C/S:484K	Estados Unidos de América
Kappa	B.1.617.1	G/452R.V3	21A/S:154K	India
Lambda**	C.37	GR/452Q.V1	21G	Perú (junio, 2021)
Mu**	B.1.621	GH	21H	Colombia (agosto, 2021)

*Variantes de preocupación, ** variantes de interés; en ambos casos se indica la fecha de designación. El resto de las variantes incluidas se consideraron originalmente como variantes de interés. Fuente: OMS (2021).

co de numerosas naciones en el mundo se ha evidenciado por la disparidad en la que dicha información ha sido recuperada. Estados Unidos de América y el Reino Unido han compartido el mayor número de secuencias con el resto del mundo, mientras que las dificultades políticas y económicas de los países en vías de desarrollo limitan su participación.

A partir del análisis de las secuencias genómicas del SARS-CoV-2, ha sido posible dilucidar que las variantes de preocupación tienden a presentar mutaciones en la subunidad S1 de la proteína S. La variante Alfa, por ejemplo, posee diez cambios en la secuencia de esta proteína, lo que hace más probable que el RBD permanezca en una posición más

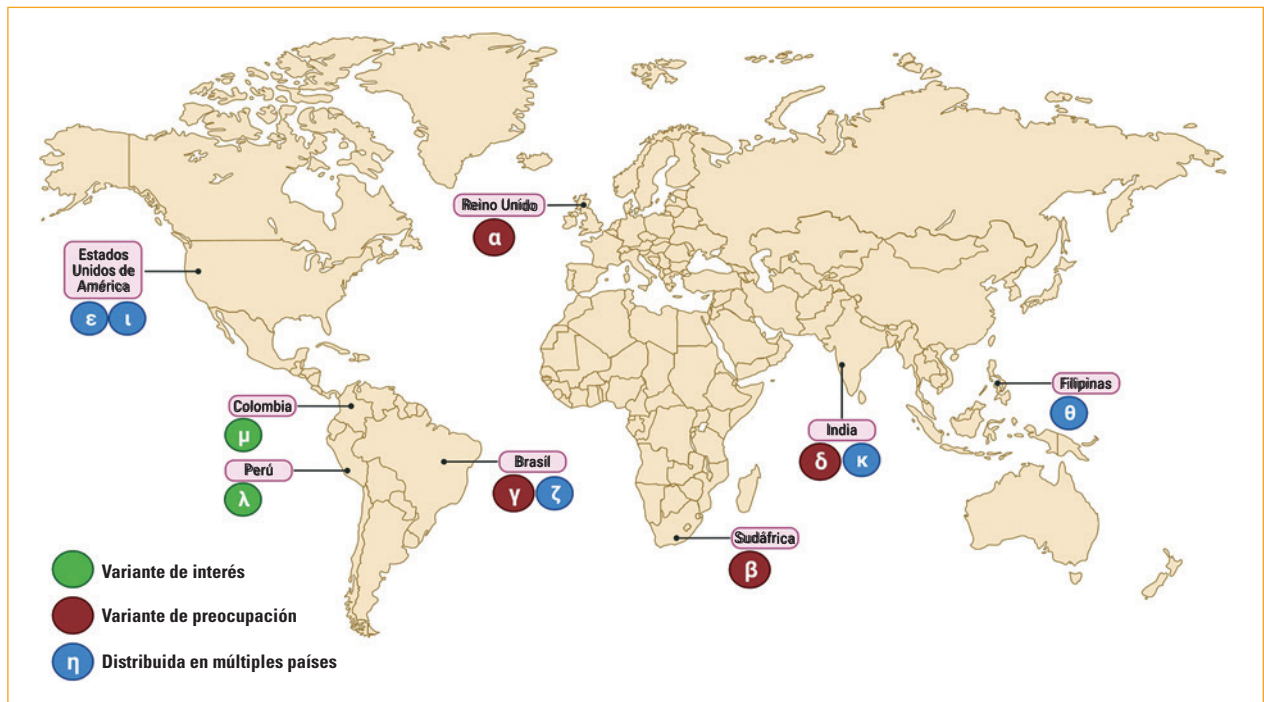


Figura 3. Países con evidencias iniciales de circulación de variantes de interés y de preocupación en el transcurso de la pandemia.

expuesta y se facilite su interacción con ACE-2 en las células, lo que resulta en un acceso más eficiente del virus. Por su parte, la variante Delta alberga múltiples mutaciones en la subunidad S1, incluidas tres en el RBD. Estas mutaciones mejoran la capacidad del RBD para unirse a ACE-2, optimizan la entrada del virus a la célula y facilitan su transmisión. Además de las mutaciones en el RBD, hay mutaciones en el sitio de corte de la furina que se relacionan también con un aumento en la propagación del virus, mientras que otras mutaciones que resultan en cambios de la estructura del SARS-CoV-2 conducen a un camuflaje más eficiente del virus, lo cual a su vez conduce a la evasión de la respuesta inmune y resulta en la persistencia de la infección. Por otra parte, reportes recientes sugieren que las mutaciones encontradas en otras proteínas estructurales, como en el caso de la proteína N, influyen también en una mayor transmisión del virus. Por lo tanto, la secuenciación del genoma del SARS-CoV-2 permite no sólo estudiarlo desde sus orígenes, sino rastrear su distribución por el mundo e identificar de forma oportuna el surgimiento de nuevas variantes que representen un riesgo para la población.

Conclusiones

Al pasar de una célula a otra y de una persona a otra, el SARS-CoV-2 cambia. Las mutaciones dan origen a variantes del virus que, en algunos casos, le ayudarán a adherirse a las células con mayor fuerza, o bien le permitirán esconderse de la respuesta inmunitaria. En términos de evolución, la selección de variantes con dichas características permitirá una transmisión más eficiente del virus.

Más allá de los factores propios de los virus, la actividad humana y su relación con el entorno también tiene influencia en la generación de nuevas mutaciones, de modo que para limitar el surgimiento de nuevas variantes del SARS-CoV-2, y debido a que éstas se relacionan con el copiado constante del virus, todos los mecanismos de protección con los que contamos (vacunación, uso de cubrebocas y distanciamiento físico) serán muy importantes para

Recuadro 2.

Ómicron, la preocupación más reciente

El 24 de noviembre de 2021 Sudáfrica notificó a la OMS la circulación de la variante B.1.1.529, identificada a partir de una muestra tomada el 9 de noviembre del mismo año. Esta variante se caracteriza por presentar un gran número de mutaciones, que dan lugar a 30 cambios en la proteína S. Debido a que muchos de estos cambios se encuentran también en Delta y Alfa y se asocian a una mayor infectividad y evasión de la respuesta inmune, el 26 de noviembre de 2021 la OMS declaró a esta nueva variante, denominada Ómicron, como variante de preocupación.

La circulación de Ómicron en Sudáfrica resultó en un aumento acelerado en el número de casos. La aparente alta tasa de transmisión de esta variante alertó al mundo. Al 15 de diciembre de 2021 Ómicron circula en 77 países. Además, los resultados iniciales sugieren que el riesgo de reinfectarse por Ómicron es mayor que con otras variantes. Carecemos aún de evidencia del desarrollo de formas más severas de la infección y desconocemos el efecto de esta variante en la efectividad de las vacunas disponibles. No obstante, lo que es claro es que el origen de Ómicron obedece en gran medida a la desigualdad global en la vacunación, por lo que la prioridad debe ser “proteger a los más desprotegidos a través de la vacunación”, como afirmó el director general de la OMS.



reducir el número de contagios y, por lo tanto, la multiplicación del virus.

Asimismo, se deben implementar políticas encaminadas a fortalecer las capacidades de secuenciación y de vigilancia epidemiológica de forma sistemática. Esto es indispensable para tener un panorama claro del grado de transmisión de las variantes del SARS-CoV-2 y para detectar eventos inusuales en su distribución. Para ello, se tendrán que destinar fondos para contar con laboratorios y recursos humanos especializados para el estudio del virus. Ésta es una prioridad en el escenario de la pandemia actual, y considerarla como tal nos llevará a establecer

mecanismos eficaces para contender contra otras infecciones emergentes en los próximos años.

Agradezco a la doctora Karen L. Reyes Barrera y al maestro en ciencias Julio Y. Anaya Covarrubias por su revisión crítica del manuscrito; asimismo, a los auténticos conocedores de virus que caminan conmigo y de quienes tengo aún mucho por aprender.

Nora A. Fierro

Departamento de Inmunología, Instituto de Investigaciones Biomédicas, Universidad Nacional Autónoma de México.

noraalma@iibiomedicas.unam.mx

Lecturas recomendables

- Bose, P., P. Sunita y S. P. Pattanayak (2021), “Molecular insights into the crosstalk between immune inflammation nexus and SARS-CoV-2 virus”, *Current Microbiology*, 78:3813-3828. Disponible en: <www.doi.org/10.1007/s00284-021-02657-9>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Bou-Karroum, L. *et al.* (2021), “Public health effects of travel-related policies on the COVID-19 pandemic: a mixed-methods systematic review”, *Journal of Infection*, 83:413-423. Disponible en: <www.doi.org/10.1016/j.jinf.2021.07.017>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Cevallos, M. A. (2021), “La amenaza delta”, *¿Cómo ves?*, 264:8-13. Disponible en: <www.comoves.unam.mx/numeros/articulo/274/la-amenaza-delta>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Chhibber, A. *et al.* (2021), “Assessment of health equity consideration in masking/PPE policies to contain COVID-19 using PROGRESS-plus framework: a systematic review”, *BioMed Central Public Health*, 21:1682. Disponible en: <www.doi.org/10.1186/s12889-021-11688-7>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Consortio Mexicano de Vigilancia Genómica (CoVi-Gen-Mex) (2021), *MexCoV2*. Disponible en: <www.mexcov2.ibt.unam.mx:8080/COVID-TRACKER/>, consultada el 10 de noviembre de 2021.
- GISAID (2021), *GISAID*. Disponible en: <www.gisaid.org/>, consultada el 9 de noviembre de 2021.
- Gobeil, S. M. *et al.* (2021), “Effect of natural mutations of SARS-CoV-2 on spike structure, conformation, and antigenicity”, *Science*, 373:eabi6226. Disponible en: <www.doi.org/10.1126/science.abi6226>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Gupta, D. *et al.* (2021), “Structural and functional insights into the spike protein mutations of emerging SARS-CoV-2 variants”, *Cellular and Molecular Life Sciences*. Disponible en: <www.doi.org/10.1007/s00018-021-04008-0>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Mahase, E. (2021), “How many variants are there, and what do we know about them?”, *British Medical Journal*, 74:n1971. Disponible en: <www.doi.org/10.1136/bmj.n1971>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Nextstrain (2021), *Nextstrain SARS-CoV-2 Resources*. Disponible en: <www.nextstrain.org/sars-cov-2/>, consultada el 9 de noviembre de 2021.
- OMS (2021), “Seguimiento de las variantes del SARS-CoV-2”, *Organización Mundial de la Salud*. Disponible en: <www.who.int/es/activities/tracking-SARS-CoV-2-variants>, consultada el 9 de noviembre de 2021.
- SARS-CoV-2 Lineages (2021), *PANGO Lineages*. Disponible en: <www.cov-lineages.org/>, consultada el 9 de noviembre de 2021.
- Syed, A. M. *et al.* (2021), “Rapid assessment of SARS-CoV-2 evolved variants using virus-like particles”, *Science*, 4: eabl6184. Disponible en: <www.doi.org/10.1126/science.abl6184>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Sztain, T. *et al.* (2021), “A glycan gate controls opening of the SARS-CoV-2 spike protein”, *Nature Chemistry*, 13:963-968. Disponible en: <www.doi.org/10.1038/s41557-021-00758-3>, consultada el 23 de noviembre de 2021.
- Zella, D. *et al.* (2021), “The variants question: What is the problem?”, *Journal of Medical Virology*, 93:6479-6485. Disponible en: <www.doi.org/10.1002/jmv.27196>, consultada el 23 de noviembre de 2021.

José Eduardo González Reyes

Desde las redes

Mentir bajo el cubrebocas

En los juicios penales presenciales en los que se requiere de un jurado, éste se encarga de determinar si la persona acusada es inocente o culpable luego de discernir si miente o dice la verdad en sus declaraciones, junto con las pruebas que se presenten durante el caso. Para descifrar si el testimonio es verídico o mentira, el jurado puede ayudarse de la comunicación no verbal, como la gestulación facial; sin embargo, esta última se ha visto eclipsada por el uso de los cubrebocas en los tribunales para evitar la propagación del virus SARS-CoV-2 durante la pandemia de COVID-19. ¿Esto es una limitante para la impartición de justicia? Aldert Vrij, de la Universidad de Portsmouth, y Maria Hartwig, del Colegio John Jay de Justicia Criminal, revisaron la literatura para responder a esta interrogante.

Existe la creencia generalizada de que 93% de toda la comunicación se produce en canales no verbales, lo que hace parecer que la comunicación no verbal sea más importante que el contenido del discurso. Esta idea se deriva de una investigación de Albert Mehrabian, realizada en la década de 1960, en la que los participantes sólo podían expresar men-

sajes de pocas palabras, como “me gusta” o “no me gusta”. Si alguien apenas habla, el comportamiento no verbal –naturalmente– tiene que ser la fuente de información más importante, pero esto no significa que la llamada regla de Mehrabian pueda aplicarse a los entornos en los que alguien habla más, como cuando da su testimonio durante un juicio.

Luego de analizar cientos de estudios sobre el engaño, los investigadores concluyeron que los cubrebocas no obstaculizan la toma de decisiones del jurado. Encontraron que las expresiones faciales y otras formas de comportamiento no verbal son un indicador poco confiable de engaño, por lo que enmascarar estas acciones en realidad mejora la capacidad del jurado para diferenciar entre la verdad y la mentira. Durante el estudio también cuestionaron las condiciones al hacer juicios por medio de video en vivo. De la misma manera que las mascarillas, las videollamadas imposibilitan poner atención a la comunicación no verbal realizada con el cuerpo completo y permiten que los miembros del jurado centren su atención en el discurso, lo que les puede ayudar a encontrar mentiras de una mejor manera. Los autores de la revisión señalan que estos hallazgos abren la puerta a más experimentos para mejorar las condiciones en las que se llevarán a cabo los juicios en el futuro, después de la pandemia.



El uso de cubrebocas en los tribunales no parece ser una limitante para la impartición de justicia. Crédito: Vblock/Pixabay.

Más información

Vrij, A. y M. Hartwig (2021), “Deception and Lie Detection in the Courtroom: The Effect of Defendants Wearing Medical Face Masks”, *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 10(3):392-399. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.jarmac.2021.06.002>, consultado el 17 de diciembre de 2021.

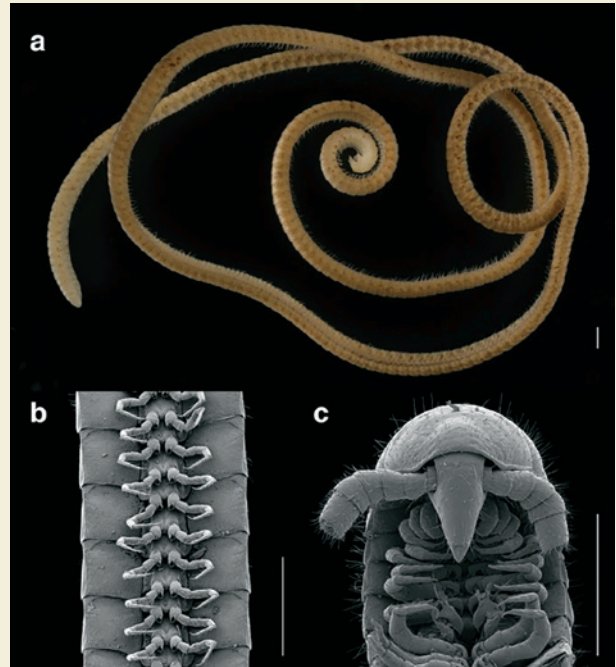
El primer milpiés con mil pies

Los milpiés son unos de los primeros animales en respirar oxígeno atmosférico y se estima que han vivido en este planeta durante más de 400 millones de años. Son importantes descomponedores en los ecosistemas terrestres, aunque existen algunas especies que son depredadoras. Las crías de milpiés emergen del huevo con cuatro pares de patas y van agregando segmentos a su cuerpo por un tiempo indeterminado, incluso durante su edad adulta.

Hasta la fecha, el récord del milpiés con el mayor número de patas lo tenía la especie *Illacme plenipes*, que alcanza el increíble número de 750 patas en un sólo organismo. No obstante, un grupo de investigadores de Estados Unidos de América y de Australia acaba de descubrir el primer milpiés que hace honor a su nombre, pues cuenta con 1 306 patas. El hallazgo fue comunicado en *Scientific Reports* a finales de 2021. El ejemplar se encontró en un pozo de perforación creado para la exploración minera en Eastern Goldfields, Australia, y permitió caracterizar a una nueva especie de milpiés, que fue bautizada como *Eumillipes persephone*. Su nombre deriva de la raíz griega *eu* (“verdadero”) y las palabras latinas *mil* (“mil”) y *pes* (“pie”); además, hace referencia a la diosa griega del inframundo, Perséfone.

Los autores midieron a cuatro miembros de la nueva especie y encontraron que tienen cuerpos largos y parecidos a hilos, que constan de hasta 330 segmentos y miden aproximadamente 0.95 mm de ancho y 95.7 mm de largo. No tienen ojos, tienen patas cortas y cabezas en forma de cono con antenas y pico.

El análisis evolutivo entre las especies sugiere que *E. persephone* tiene una relación lejana con el poseedor del récord anterior para el mayor número de



Eumillipes persephone, el animal con más patas del mundo: a) hembra con 330 segmentos y 1 306 patas; b) vista ventral de las piernas; c) vista dorsal de la cabeza. Barras de escala: 0.5 mm. Crédito: Paul E. Marek *et al.*

patas. Los autores sugieren que la gran cantidad de segmentos y patas que han evolucionado en ambas especies puede permitirles generar fuerzas de empuje para moverse por aberturas estrechas en los hábitats del suelo. Además, señalan que es de suma importancia conocer y preservar la biodiversidad bajo tierra antes de realizar trabajos masivos de excavación.

Más información

Marek, P. E. *et al.* (2021), “The first true millipede—1306 legs long”, *Scientific Reports*, 11:23126. Disponible en: <doi.org/10.1038/s41598-021-02447-0>, consultado el 17 de diciembre de 2021.

La disyuntiva entre la presencialidad y la virtualidad

En 2017, el número de personas que viajó para asistir a alguna conferencia, congreso o exposición ascendió a 1 500 millones, y éstas se ubicaron en más de 180 países, lo que sugiere que la huella de carbono anual para la industria global de eventos es del mismo orden de magnitud que las emisiones anuales de gases de efecto invernadero (GEI) de todo Estados Unidos de América, responsable de más de 10% de las emisiones globales de dióxido de carbono (CO₂).

La pandemia de COVID-19 nos ha obligado a migrar de eventos presenciales a virtuales; esto trajo como consecuencia indirecta una disminución en la emisión de los GEI. Aunque la modalidad presencial permite un grado de interacción que es difícil de reemplazar en formatos virtuales, es válido cuestionarse si después de la pandemia el completo regreso a los eventos en persona será una alternativa válida.

Un grupo de investigadores de la Universidad de Cornell llevó a cabo un análisis para comprender el impacto de este tipo de eventos. El estudio contempló diversos factores, como los alimentos, el alojamiento, la preparación, la ejecución, las tecnologías de la información, así como la comunicación y el transporte, mediante un comparativo entre las conferencias en persona, las virtuales y las híbridas. De

esta manera, encontraron que la transición de una conferencia en persona a una virtual puede reducir sustancialmente la huella de carbono en un 94%, así como el uso de energía en un 90%. En formatos híbridos en los que se mantiene más de la mitad de la participación presencial y en los que se selecciona un lugar como sede que no promueve viajes largos para los asistentes, se tiene el potencial de reducir la huella de carbono y el uso de energía en dos tercios con respecto del formato presencial.

Los autores sugieren cambiar las opciones alimenticias ofertadas durante los eventos presenciales por platillos basados en plantas y, en el caso de las conferencias virtuales, mejorar la eficiencia energética del sector de las tecnologías de la información y la comunicación, además de buscar el uso de energías renovables en las redes eléctricas; todo ello puede contribuir a reducir aún más la huella de carbono.

Más información

Tao, Y. *et al.* (2021), "Trend towards virtual and hybrid conferences may be an effective climate change mitigation strategy", *Nature Communications*, 12:7324. Disponible en: <doi.org/10.1038/s41467-021-27251-2>, consultado el 17 de diciembre de 2021.



La transición de una conferencia presencial a una virtual puede reducir sustancialmente la huella de carbono en un 94%. Crédito: crystal710/Pixabay

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



La AMC anunció a los ganadores de los premios Weizmann 2021

La Academia Mexicana de Ciencias (AMC) dio a conocer los nombres de los ganadores de los premios Weizmann 2021. Las tesis doctorales de tres jóvenes científicos mexicanos fueron merecedoras del reconocimiento tras evaluar su originalidad, rigor académico e importancia científica de los trabajos de investigación.

La Asociación Mexicana de Amigos del Instituto Weizmann de Ciencias y la Academia otorgan en conjunto este reconocimiento desde 1986 a las mejores tesis doctorales realizadas en México por investigadores menores de 35 años, en el caso de hombres, y menores de 38 años, en el de las mujeres, en las áreas



Pablo Labra Vázquez.



Marian Jesabel Pérez Rodríguez.

de ciencias exactas y ciencias naturales. A partir de 2001 también se otorga a las mejores tesis doctorales en ingeniería y tecnología.

Ganadores de los premios Weizmann 2021

Ciencias exactas

- **Pablo Labra Vázquez**
Posgrado en Ciencias Químicas.
Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Título de la tesis: “Diseño, síntesis y estudio fotoquímico de nitrosilos de rutenio y de conjugados BODIPY-carborano para posibles aplicaciones en terapia e imagen celular”.
Tutor: José Norberto Farfán García.

Ciencias naturales

- **Marian Jesabel Pérez Rodríguez**
Doctorado en Ciencias en Neurofarmacología y Terapéutica Experimental.
Departamento de Farmacobiología del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional.
Título de la tesis: “Papel de la Huntingtina en la producción de mediadores inflamatorios en las células cebadas y su posible implicación en la enfermedad de Huntington”.
Tutoras: Claudia González Espinosa y Francisca Pérez Severiano.

Ingeniería y tecnología

- **Alexis Tirado Cota**
Doctorado en Tecnología Avanzada.
Centro de Investigación en Ciencia Aplicada y Tecnología Avanzada, Unidad Legaria, del Instituto Politécnico Nacional.
Título de la tesis: “Modeling of a catalytic hydrotreating reactor for the production of renewable diésel”.
Tutores: Jorge Ancheyta Juárez y Fernando Trejo Zárraga.

Premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades 2021

La Academia Mexicana de Ciencias anunció a los ganadores de los premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades 2021, los cuales se otorgan desde 1996 a investigadores que no hayan cumplido 38 años en el caso de los hombres, y 40 años en el de las mujeres, y cuyas tesis se hayan realizado en el país en alguna institución acreditada.

La convocatoria anual de este premio se lleva cabo en conjunto con nueve instituciones representativas de las ciencias sociales y las humanidades en México: la Universidad Nacional Autónoma de México, la Universidad Autónoma Metropolitana, El Colegio de México, la Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales, el Centro de Investigación y Docencia Económicas, el Instituto José María Luis Mora, el Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social, el Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional y el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Ganadores de los premios de la Academia a las mejores tesis de doctorado en ciencias sociales y humanidades 2021

Ciencias sociales

- **Miguel Ángel Monteverde Ávalos**
Doctorado en Ciencias Sociales y Políticas.
Departamento de Ciencias Sociales de la Universidad Iberoamericana.
Título de la tesis: “Tensiones en el Barrio. Una etnografía sobre las dinámicas de la violencia estructural y de la estigmatización territorial en San Agustín, Ecatepec”.
Tutor: Manolo E. Vela Castañeda.
- **Omar de la Cruz Carrillo**
Doctorado en Ciencias Políticas y Sociales.
Facultad de Ciencias Políticas y Sociales de la Universidad Nacional Autónoma de México.
Título de la tesis: “Judicialización electoral en

América Latina: el desempeño de las cortes en la promoción de los derechos políticos de la mujer, 1993-2018”

Tutora: Jacqueline Peschard Mariscal.

Humanidades

- **Malinalli Hernández Rivera**

Doctorado en Historia.

Centro de Estudios Históricos de El Colegio de Michoacán, A. C.

Título de la tesis: “Los libros peregrinos. Desmembramiento, tránsito y dispersión de las bibliotecas jesuitas novohispanas a través de sus Juntas de Temporalidades, 1767-1789”

Tutor: Thomas Calvo Ribes.

- **Martín Humberto González Romero**

Doctorado en Historia.

Centro de Estudios Históricos de El Colegio de México.

Título de la tesis: “La revolución sexual. Debates públicos de sexualidad, política y cultura en la Ciudad de México, 1960-1984”

Tutoras: Gabriela Cano Ortega y Vanni Pettinà.

Concursos nacionales de las olimpiadas de biología, química e historia

El concurso nacional de la Olimpiada de Biología se llevó a cabo del 22 al 24 de noviembre

de 2021 de manera virtual. Participaron 142 alumnos de 24 estados de la República. Se otorgaron 14 medallas de oro, 20 de plata y 25 de bronce. Los alumnos ganadores de medalla de oro conformarán la base para integrar las delegaciones mexicanas que participarán en la XXXIII Olimpiada Internacional de Biología en julio de 2022 y en la XV Olimpiada Iberoamericana de Biología en septiembre de 2022.

Por otra parte, el concurso nacional de la Olimpiada de Química se celebró del 14 al 22 de noviembre de 2021, también de manera virtual. Participaron 188 alumnos de 32 estados de la República. Se otorgaron cuatro primeros lugares en el nivel A y 14 en el nivel B; ocho segundos lugares en el nivel A y 21 en el nivel B; así como nueve terceros lugares en el nivel A y 30 en el nivel B. El grupo ganador de primer lugar integrará las delegaciones mexicanas que participarán en la LIV Olimpiada Internacional de Química en el verano de 2022 y en la XXVI Olimpiada Iberoamericana de Química en octubre de 2022.

Asimismo, el concurso nacional de la Olimpiada Mexicana de Historia se llevó a cabo el 13 y 14 de noviembre de 2021, de manera virtual. En la primera etapa se contó con la participación de 8 500 estudiantes y para el concurso nacional se contó con los mejores 104 estudiantes de 16 estados. Se otorgaron cinco primeros lugares, seis segundos lugares y nueve terceros lugares.



Participantes de la XIV Olimpiada Mexicana de Historia.

Charlas con autores de la revista *Ciencia*

En las redes sociales de *Ciencia* continúan las pláticas de diversos autores que han contribuido en diferentes números de la revista. Las charlas más recientes han sido:

- 21 de septiembre de 2021: “¿El debido proceso en *Sacco y Vanzetti?*”, Carina Gómez Fröde, Facultad de Derecho de la Universidad Nacional Autónoma de México (véase: <https://youtu.be/6U3o4nUY4TI>).
- 5 de octubre de 2021: “Logros y retos ante los desastres por sismos” y presentación del número “Desastres”, David de León Escobedo, Universidad Autónoma del Estado de México (véase: <https://youtu.be/sFVcwRNJF7I>).
- 26 de octubre de 2021: “¿Qué tan peligrosos pueden ser los volcanes?”, Servando de la Cruz Reyna, Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (véase: <https://youtu.be/jQmal6BC5EE>).
- 9 de noviembre de 2021: “El cine denuncia problemas ambientales”, Rafael Tonatíuh Ramírez Beltrán, Universidad Anáhuac (véase: <https://youtu.be/LLbq4T5Dm1k>).
- 16 de noviembre de 2021: “Los efectos del confinamiento en la educación escolar”, Inés Dussel, Departamento de Investigaciones Educativas del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (véase: <https://youtu.be/3RKmWdTE9Dc>).

Webinar “Tu Mundo con Ciencia”

Continúa el ciclo de conferencias “Tu Mundo con Ciencia”, impartido por exbecarias ganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L’Oréal-Unesco-AMC. Las pláticas se llevan a cabo el segundo jueves de cada mes y son transmitidas por los canales de las redes sociales de la Academia.

Las conferencias están orientadas a jóvenes de nivel bachillerato, para fomentar las vocaciones científicas.

Conferencias virtuales de la AMC

Debido a la pandemia por la COVID-19, la AMC organiza un ciclo de conferencias virtuales en sus redes sociales, el último miércoles de cada mes. Este programa inició sus transmisiones en julio de 2020 y ha incluido a investigadores e investigadoras en temas especializados de relevancia científica y para el país.

Obituario

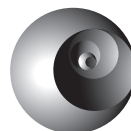
La Academia Mexicana de Ciencias lamenta profundamente el fallecimiento de Daniel Reséndiz Núñez, quien fuera presidente de la AMC en el periodo 1980-1981.



Daniel Reséndiz Núñez. Tomada de: <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Academicos/Paginas/DResendizN.aspx>

En nuestro próximo número
de abril-junio de 2022:

CONTAMINACIÓN POR MICROPLÁSTICOS



Coordinación de la
Investigación Científica UNAM

