

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias

Novedades científicas

**Mosca soldado negra: eslabón perdido
en la revalorización de residuos orgánicos**

Nanovacunas que valen oro

**La resistencia a los antibióticos:
¿el retorno a las enfermedades
incurables?**

**La célula y sus medios
de transporte de proteínas:
¿metro o taxi?**

**Investigación
vanguardista para
la preservación
ambiental**

www.revistaciencia.amc.edu.mx

ISSN 1405-6550





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

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

Novedades científicas

Galileo y Kepler (parte II)	6
<i>José Luis Álvarez García</i>	
De fotógrafos a montañistas: los <i>paparazzi</i> del enlace químico	14
<i>Ulises Torres Herrera</i>	
Liposomas, de la física biológica a la medicina molecular	22
<i>Rubén Rodrigo López Salazar y Luis Olivares Quiroz</i>	
Captemos la señal: importancia de un nuevo segundo mensajero bacteriano	28
<i>Gipumi Torres Abe, Elizabeth Cisneros Lozano y Víctor M. Ayala García</i>	
Los sistemas de transporte de proteínas en la célula: ¿metro o taxi?	36
<i>María Clara Avendaño Monsalve y Soledad Funes</i>	
Nanovacunas que valen oro	44
<i>Ana Rosa Aguilera Juárez, Carlos Eliud Angulo Valadez y Luis Hernández Adame</i>	
Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos	52
<i>Mónica Vanessa Oviedo Olvera, Juan Fernando García Trejo y Claudia Gutiérrez Antonio</i>	
La (divulgación de la) técnica al servicio de la patria	60
<i>Enrique Estrada Loera</i>	
La resistencia a los antibióticos: ¿el retorno a las enfermedades incurables?	68
<i>Karla Estephanía Zarco González, Martha M. Zarco González y Zuleyma Zarco González</i>	
¿Todos los biocombustibles son sostenibles? Analicemos su ciclo de vida	74
<i>Noemí Hernández Neri, Claudia Gutiérrez Antonio y Fernando Israel Gómez Castro</i>	

Desde la UAM

Investigación vanguardista para la preservación ambiental	83
<i>Mario de Leo Winkler, coordinador</i>	

De actualidad

La COVID-19 y su impacto en la industria manufacturera, maquiladora y de servicios de exportación	89
<i>Martha Angélica Ramírez Salazar, Felipe de Jesús Barrios Isunza y Omar Alejandro Guirette Barbosa</i>	
Vulnerabilidad familiar en una población del estado de Hidalgo, antes y durante la pandemia de COVID-19	94
<i>José Leonel Larios Ferrer, Efrén Santamaría Islas y Juan Carlos Reyes García</i>	

Noticias de la AMC



Portada: Depositphotos.



Separador: Depositphotos.

ciencia, volumen 73, número 3, correspondiente a junio-septiembre 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. Editor responsable legal: 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 4905, ciencia@unam.mx, <http://www.amc.mx>.

ciencia

Revista de la Academia Mexicana de Ciencias
julio-septiembre 2022 volumen 73 número 3

Director fundador

Ignacio Bolívar Urrutia (1850-1944)

Director

Alonso Fernández Guasti

Comité editorial

Raúl Antonio Aguilar Roblero

Raúl Ávila

Ana Cecilia Noguez

Raymundo Cea

Gabriela Dutrénit

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 Viniestra, pp. 6-7, 16, 46, 53, 58, 61, 69

Depositphotos: pp. 4, 15, 23, 29, 33, 37, 42, 45, 48-49, 54, 56, 57, 68, 72, 74-75, 79, 82, 90, 93, 95

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 4905

www.revistaciencia.amc.edu.mx



@CienciaAMC



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

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



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

Desde el Comité Editorial

Estimados lectores:

Les doy la bienvenida a este nuevo número de la revista *Ciencia*, en el que incluimos una serie de artículos de Novedades científicas que provienen de diversos campos del conocimiento. Lo abrimos con la segunda parte del artículo titulado “Galileo y Kepler”. Como vimos en la primera entrega (vol. 73, núm. 1, enero-marzo 2022), ambos astrónomos hicieron aportaciones esenciales al desarrollo de esta disciplina. En esta segunda sección el autor nos cuenta las dificultades que tuvo Galileo con la Iglesia católica y cómo fue su proceso inquisitorial. Por otro lado, nos reseña un problema parecido que enfrentó Kepler al tener que acompañar a su madre también ante un proceso en el que fue acusada por brujería. Estos dos grandes personajes jamás se conocieron, pero protagonizaron algunos episodios relacionados con la Iglesia que se desarrollaron de manera paralela.

En el segundo artículo, “De fotógrafos a montañistas: los *paparazzi* del enlace químico”, se habla de este último como un ente sutil y escurridizo; no obstante, un grupo de investigación emprendió una aventura y logró desentrañar sus secretos al fotografiar las moléculas muy de cerca. Al interpretar esas fotos, se encontraron complicadas crestas, valles y picos de montañas que encierran las propiedades del enlace químico. En el artículo encontramos respuestas a preguntas tan importantes como: ¿qué nos puede decir la física cuántica de los enlaces químicos?

Por otra parte, “Liposomas, de la física biológica a la medicina molecular” explica que los liposomas son pequeñas vesículas esféricas con la capacidad de encapsular elementos tan diversos como medicamentos, proteínas o material genético. Los liposomas transportan por el torrente sanguíneo o por otros mecanismos los compuestos químicos para posteriormente liberarlos en regiones específicas del organismo. Además, protegen su carga del exterior y evitan dañar los tejidos sanos. Por lo anterior, los liposomas representan el futuro de las terapias médicas, ya que permiten que los fármacos lleguen en altas concentraciones a una zona deseada.

Asimismo, recientemente se descubrió en algunas bacterias un segundo mensajero dinucleotídico esencial que participa en la regulación de varias vías metabólicas ante cambios detectados por las células. Esta molécula (c-di-AMP) es importante para la comunicación y homeostasis celular, para la reparación del ADN, la resistencia a antibióticos, entre otras actividades con potencial aplicación biotecnológica. Todo esto se podrá descubrir en “Captamos la señal: importancia de un nuevo segundo mensajero bacteriano”.

De una manera divertida las autoras del artículo “Los sistemas de transporte de proteínas en la célula: ¿metro o taxi?” hacen una analogía entre el complicado

mecanismo de transporte de las proteínas dentro de una célula y la compleja red de transporte que tiene una ciudad. También van dando respuesta a estas fascinantes preguntas: ¿cómo están organizados los sistemas de transporte de proteínas dentro de la célula?, ¿cómo “sabe” una proteína que debe dirigirse a algún organelo en particular para ejercer su función?, ¿qué sucede si fallan los sistemas de transporte celular?

“Nanovacunas que valen oro” es el título del artículo que habla del uso de nanopartículas como vehículos de entrega de vacunas. Las nanopartículas de oro tienen varias aplicaciones biomédicas debido a su estabilidad, baja toxicidad, biocompatibilidad, fácil síntesis y funcionalización. Su empleo es una alternativa novedosa sujeta a estudio para la formulación de vacunas. El autor propone, a partir de un método sencillo de síntesis, un prototipo de vacuna contra infecciones gastrointestinales basado en nanopartículas de oro.

La revalorización es un área de la biotecnología que permite generar nuevos productos a partir de los residuos contaminantes. En el artículo: “Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de re-

valorización de residuos orgánicos” se explica que esta especie representa una estrategia eficiente para la revalorización de los residuos orgánicos. Esta tecnología no sólo permite reducir el volumen de los residuos orgánicos, sino que también genera una biomasa que puede convertirse en productos de valor agregado o biocombustibles.

El autor del artículo “La (divulgación de la) técnica al servicio de la patria” nos presenta de manera general los programas de divulgación de la ciencia que tiene el Instituto Politécnico Nacional y, en particular, las actividades de divulgación que ha llevado a cabo el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (Citedi). El Citedi es un referente en investigación en sistemas digitales y el principal forjador de recursos humanos especializados en el noroeste de México. Como dice el autor, urge impulsar e incrementar la divulgación de la ciencia mediante esfuerzos de las instituciones y sus investigadores para contrarrestar la diseminación de falsedades que se publican en las redes sociales digitales.

El artículo “La resistencia a los antibióticos: ¿el retorno a las enfermedades incurables?” trata un tema muy actual y cada vez más preocupante: la re-



sistencia bacteriana. ¿Cuántas veces has interrumpido tu tratamiento con antibióticos porque ya te sientes mejor?, ¿cuántas veces has abusado de ellos, por ejemplo, para aliviar una gripa? Los antibióticos están perdiendo efectividad para combatir a las bacterias. Además, se da respuesta a otras preguntas: ¿cómo ocurre la resistencia a los antibióticos?, ¿cuáles son sus causas?, ¿qué consecuencias tiene?

Los biocombustibles son una alternativa energética renovable; sin embargo, su producción genera preocupación respecto a la seguridad alimentaria, deforestación, pérdida de la biodiversidad y emisiones contaminantes. Para evaluar si los biocombustibles son sostenibles se deben cuantificar los impactos económicos, ambientales y sociales asociados con su producción. Este interesante tema se aborda en el artículo “¿Todos los biocombustibles son sostenibles? Analicemos su ciclo de vida”.

En la sección Desde la UAM encontramos el artículo titulado: “Investigación vanguardista para la preservación ambiental”. En él se exponen cinco diferentes proyectos de investigación de vanguardia que llevan como títulos: “Circularidad de residuos plásticos en México”, “Biopolímeros y materiales biodegradables”, “Manejo forestal comunitario: alternativa para almacenar carbono”, “Captura de gases de efecto invernadero” y “Membranas de óxido de grafeno para mejorar la calidad del agua”. Todos estos proyectos tienen como finalidad contribuir al cuidado del ambiente, además de tener un contundente impacto social.

Por último, en la sección De actualidad encontramos dos artículos relacionados con el impacto

del confinamiento impuesto ante la pandemia de la COVID-19 desde un punto de vista económico. En el primero, “La COVID-19 y su impacto en la industria manufacturera, maquiladora y de servicios de exportación” se dan a conocer los efectos que sufrieron las empresas de este sector en México durante 2020. Para el análisis se tomó en cuenta la estadística mensual del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) y se consideraron los indicadores: personal ocupado, horas trabajadas y remuneraciones. Claramente, 2020 inició con valores negativos en estos parámetros, mismos que se agravaron con la suspensión de las actividades no esenciales decretada en marzo; a partir de junio, de manera paulatina han tenido una recuperación, aunque insuficiente para igualar las cifras de 2019.

En el segundo artículo de esta sección se habla acerca de los efectos de la COVID-19 sobre la economía familiar. En el artículo “Vulnerabilidad familiar en una población del estado de Hidalgo, antes y durante la pandemia de COVID-19”, los autores explican que la pandemia afectó a los grupos más vulnerables en el aspecto económico. En términos generales, los resultados de esta investigación mostraron una diferencia entre el bienestar familiar antes y durante la pandemia, con base en dos variables relacionadas con el ingreso: cantidad de trabajadores en los hogares y sueldo e ingreso por actividades diversas.

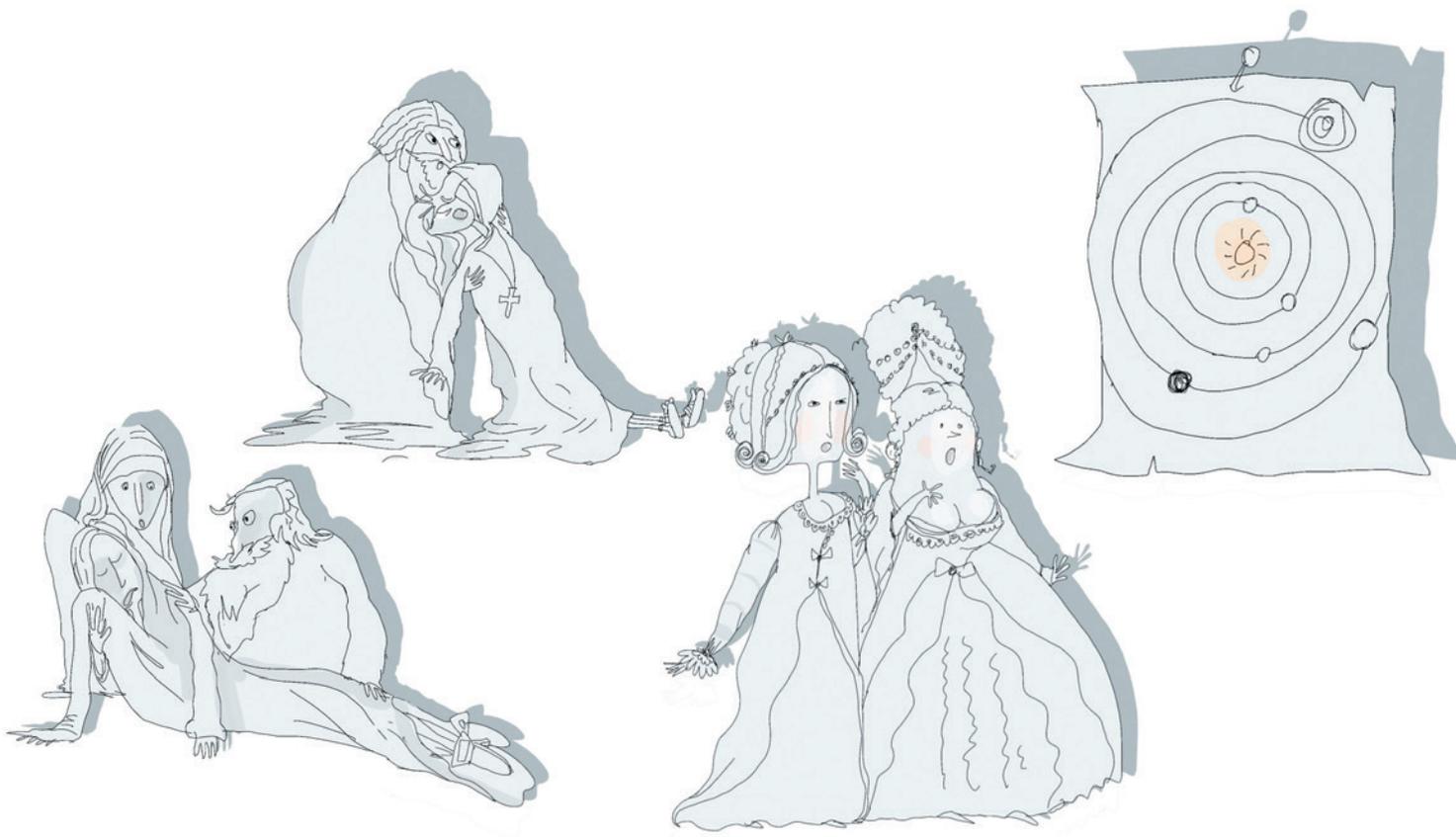
Todos estos artículos conforman un número interesante; espero que disfruten su lectura.

ALONSO FERNÁNDEZ GUASTI
Director

Galileo y Kepler

(parte II)*

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



* Para leer la primera parte de este trabajo véase Álvarez García, J. L. (2022), "Galileo y Kepler (parte I)", *Ciencia*, 73(1):34-41. Disponible en: <https://revistaciencia.amc.edu.mx/index.php/vol-73-numero-1/923-galileo-y-kepler-parte-i>.

Galileo en la Toscana y su conflicto con la Iglesia

Una vez instalado en Florencia, y en consistencia con su gran proyecto de propaganda cultural con el cual estaba convencido de que debía atraer a la Iglesia a la causa del copernicanismo, Galileo decide que es el momento de conquistar la ciudadela romana. Es cordialmente recibido en Roma en 1611, pero, de manera equivocada, Galileo interpreta este recibimiento como una aprobación para seguir escribiendo. Con su visita al padre Christopher Clavius, matemático y presidente del Colegio Romano, pudo comprobar que las observaciones con el telescopio de los jesuitas y las suyas coincidían. También lo recibió el papa Pablo V, quien le dio su bendición. Esto tranquilizó a Galileo, pues Pablo V tenía fama de tirano y excéntrico. El principal consejero papal, el cardenal Roberto Bellarmino (véase la Figura 1), quien había sido inquisidor de Giordano Bruno, era un experto en teología y se le consideraba un gran pensador de la Iglesia. Cuando se dio cuenta de que en Roma no se hablaba de otra cosa más que de los descubrimientos de Galileo y del modelo heliocéntrico, pidió un informe a los matemáticos jesuitas del Colegio Romano, quienes básicamente concluyeron que Galileo tenía razón.

Ya desde esa visita, aparentemente triunfal para Galileo, algunos personajes poderosos de la Iglesia mostraron cautela debido al “revuelo que estaban causan-





Figura 1. El cardenal Roberto Bellarmino.

do sus escritos”; en ese tiempo también comenzaron los ataques por parte de personajes de poca monta. Por ejemplo, unos integrantes menores de la orden de los dominicos, reunidos en el grupo que Galileo denominaba despectivamente la Liga de los Pichones, lo acusaron de estar interpretando las Sagradas Escrituras, algo que correspondía exclusivamente a los padres de la Iglesia. El 21 de diciembre de 1614, un miembro de la Liga de los Pichones, el dominico Tommaso Caccini, leyó en la iglesia de Santa María de Novella en Florencia el texto bíblico que narra el milagro de Josué, en el que el Sol se detuvo en el cielo. Las reacciones ante este hecho no se hicieron esperar y la sociedad florentina se polarizó. Incluso el padre Luigi Maraffi, general de los dominicos, le escribió a Galileo para manifestar su indignación por la conducta de Caccini, un hermano de su orden.

Sin embargo, las cosas empeoraron cuando otro miembro de los Pichones, el padre dominico Niccolò Lorini, planteó el problema de manera formal ante la Inquisición. Su principal prueba era una carta de Galileo dirigida al padre Benedetto Castelli,

fecha cuatro meses atrás, en la que planteaba su manifiesto sobre el sistema copernicano. La Inquisición estaba obligada tradicionalmente a aceptar y dar curso a todas las denuncias que recibía, por lo que dio inicio a un procedimiento muy meticuloso. Hasta el momento sólo se contaba con la copia de la carta y el testimonio –sin mucho valor– de varios sacerdotes de poca importancia. No obstante, Caccini pasó a la ofensiva y se presentó en Roma para ampliar las acusaciones contra Galileo.

Por su lado, Galileo, al darse cuenta de lo peligroso de la situación, decidió ir a Roma a entrevistarse con el cardenal Bellarmino, quien era el inquisidor general de aquella ciudad. Galileo viajó el 3 de diciembre de 1615, en una situación totalmente diferente a la de su anterior visita al Vaticano. En esta ocasión tenía que lograr que se retirara la acusación en su contra, que se castigara a sus acusadores y que se bendijese el método de la nueva ciencia.

No obstante, Galileo se percató de que sus amigos en el Vaticano eran cada vez más cautelosos. Aunque en febrero de 1616 le comunicaron que había sido exculpado de las acusaciones de Caccini, Galileo decidió quedarse en Roma para comprobar qué postura tomaba finalmente la Iglesia. Durante semanas, once personas llamadas calificadores y consultores se reunieron para estudiar el problema copernicano. Eran expertos en teología, pero ninguno tenía conocimientos avanzados de matemáticas y astronomía. Sus conclusiones fueron que la idea de que el Sol estaba en el centro del universo era herética, ya que contradecía el sentido de las Sagradas Escrituras, y la proposición de que la Tierra no fuese el centro del universo iba en contra de la fe. Con ese dictamen, el papa Pablo V ordenó al cardenal Bellarmino que se entrevistara con Galileo para advertirle que no debía enseñar ni defender el copernicanismo. Y si Galileo se oponía, Bellarmino tenía la orden de encarcelarlo.

El 26 de febrero de 1616 Bellarmino recibió a Galileo para decirle claramente que la postura oficial de la Iglesia era oponerse a la teoría copernicana por considerarla errónea y, por ello, se le ordenaba que la abandonase. Galileo, entre la espada y la pared, no pudo más que asentir y prometer que obedecería. Su

actitud sumisa le ayudó a que sólo lo amonestaran verbalmente. El 5 de marzo se publicó un decreto oficial del Vaticano en el que se declaraban las ideas de Copérnico como contrarias a las Sagradas Escrituras; sin embargo, no se mencionaba a Galileo ni a sus libros. Antes de regresar a Florencia, Galileo le pidió a Bellarmino un documento en el cual quedara claro que no había sido condenado. Comprendiendo el temor de Galileo y la necesidad que tenía de defenderse de sus enemigos, Bellarmino extendió la carta.

El proceso ante la Inquisición

■ Aparentemente, la cuestión del heliocentrismo había quedado zanjada; no obstante, dieciséis años después, la publicación del *Diálogo sobre los dos sistemas máximos* provocaría un alud de ideas y opiniones sobre la física aristotélica (véase la Figura 2). Ya en 1623 la noticia de la elección de Maffeo Barberini como papa (llamado Urbano VIII) generó gran alegría entre los católicos más liberales; él había conseguido que no se condenaran muchos textos heliocéntricos, como *De revolutionibus*, entre otros. Galileo logró entrevistarse con Urbano VIII varias veces en Roma en 1624 y le insinuó que le gustaría escribir un libro sobre las ventajas y desventajas de los sistemas copernicano y ptolomeico. Su interlocutor le dijo que estaba bien, siempre y cuando el libro fuese neutral, pues no había ninguna prueba que demostrara en definitiva el heliocentrismo. Galileo señaló que tenía una prueba, que era la teoría de las mareas. No obstante, esta teoría era errónea, pues planteaba que las mareas eran el resultado de los movimientos combinados de rotación y traslación de la Tierra.

Galileo salió muy contento de la entrevista con el papa y se abocó a escribir un libro en el que aparecen tres personajes. Uno de ellos es Salviati, portavoz de Galileo; otro es Sagredo, un hombre inteligente que hace preguntas ingeniosas y que, a menudo, se deja convencer por los razonamientos de Salviati; por último está Simplicio, defensor de las ideas de Aristóteles. El *Diálogo* apareció en febrero de 1632, tras un largo proceso de escritura y diversas vicisitudes. El libro fue muy bien acogido en Roma al principio,

quizá por el prestigio de Galileo, pero los problemas no se hicieron esperar.

El jesuita Christopher Scheiner leyó la obra y se sintió muy molesto porque Galileo arremetía contra él y lo trataba como un simple aficionado. Scheiner era un astrónomo muy competente con quien Galileo había tenido una polémica con motivo de la prioridad sobre la observación de las manchas solares. Scheiner recurrió al apoyo de su orden y se alió con el padre Horatio Grassi, que también había sufrido el ataque de la pluma de Galileo durante una controversia sobre los cometas. Así, los jesuitas comenzaron a moverse para defender a dos miembros importantes de su orden.

El padre Niccolò Riccardi, censor de la obra, se dio cuenta de su error al haber autorizado su publicación y de inmediato ordenó la incautación del libro. A finales de agosto de 1632 el impresor Gian Battista Landini recibió una orden de la Inquisición para que se retirara el *Diálogo* de la venta y el papa nombró una comisión de teólogos para que determinaran si incurría en el error. Galileo, alarmado, acudió a su benefactor, el gran duque de Toscana, quien ordenó a su embajador en Roma que lo informara de la situación. La noticia fue que, por deferencia al duque, se había formado una comisión; si él no hubiera sido el benefactor de Galileo, el asunto habría pasado directamente al Tribunal de la Inquisición. Además, el

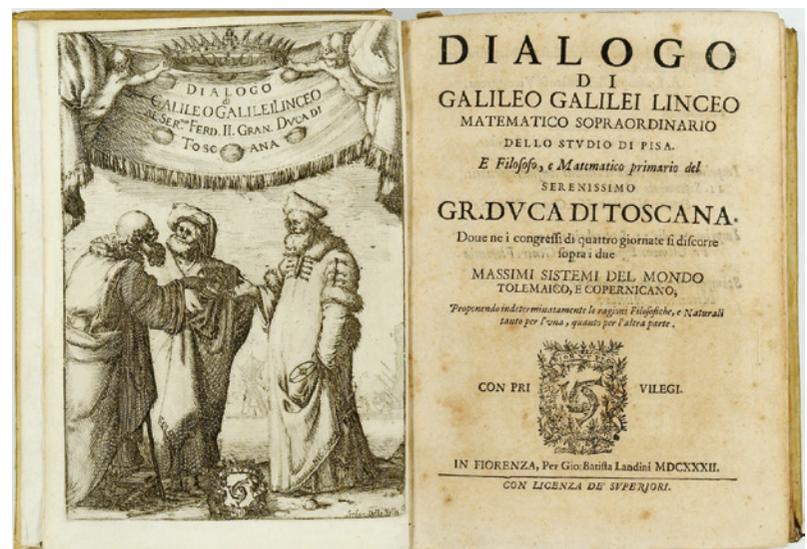


Figura 2. Portada del *Diálogo*.

embajador confirmó que el papa estaba furioso, convencido por Scheiner y Grassi de que el personaje de Simplicio que aparecía en el libro estaba inspirado en su persona.

La comisión pontificia presentó sus conclusiones a mediados de septiembre. Entre ellas estaba la acusación de haber puesto la sagrada doctrina “en boca de un tonto”, refiriéndose a Simplicio. Esto alimentaba aún más la cólera del papa. Pero lo más importante fue que la comisión encontró en los archivos secretos del Vaticano un documento de amonestación fechado en 1616. A partir de ahí, la maquinaria de la Inquisición se puso en marcha para saber si Galileo había incumplido la orden de Bellarmino; para ello, pidieron tres informes periciales distintos que indicaron que Galileo sí había desobedecido. El inquisidor de Florencia recibió la orden de llevar a Galileo a Roma, lo cual fue comunicado de manera oficial el 1 de octubre de 1632 mediante un requerimiento de la Inquisición.

Galileo inició el viaje el 20 de enero de 1633, pero no llegaría a Roma sino hasta el 23 de febre-

ro. El embajador de Florencia en Roma se enteró de que la acusación principal iba a ser la desobediencia; según los miembros de la Inquisición, a Galileo le habían ordenado en 1616 que no analizara el asunto del movimiento de la Tierra ni hablara de él.

El 12 de abril de 1633 comenzó el proceso (véase la Figura 3). El inquisidor era Vincenzo Maculano y el fiscal del Santo Oficio, Carlo Sincero; ambos eran de la orden de los dominicos. Enseguida se encauzó el proceso hacia la entrevista que en 1616 mantuvieron Galileo y Bellarmino. El fiscal sacó a relucir el documento ya mencionado sobre dicha entrevista donde se decía que Galileo no debía sostener las teorías de Copérnico ni enseñarlas ni defenderlas en modo alguno, ni de palabra ni por escrito. Sin embargo, el documento no estaba firmado por nadie. Galileo protestó, ya que ese papel no reflejaba su encuentro con Bellarmino en 1616. Indicó que el cardenal le permitió seguir tratando el tema siempre y cuando hablara del heliocentrismo de manera hipotética y sin polemizar con los defensores de otras posturas aun probables (algo que no hizo, recuérdese



Figura 3. Galileo ante el Santo Oficio.

la carta a Castelli y, posteriormente, una carta a la gran duquesa Cristina de Lorena). Galileo recordaba que el compromiso de 1616 fue oral, sin que quedase nada registrado por escrito; de hecho, él conservaba la carta que Bellarmino le había extendido a petición suya. El documento que mostraba Galileo, con la firma del cardenal, era mucho menos confuso que el presentado por el fiscal.

El Tribunal de la Inquisición disponía de diferentes informes periciales que demostraban que el *Diálogo* de Galileo sí defendía las teorías de Copérnico y que presentaba como estúpidos a quienes preferían “la interpretación corriente de las Escrituras”. Otra de las acusaciones era la de haberse atrevido a revisar y analizar las Sagradas Escrituras. Que un laico como Galileo se ocupase de asuntos teológicos, usurpando la tarea de los teólogos, no sólo se veía como intolerable, sino además peligroso para la fe. Al principio Galileo se había mostrado firme, pero sus interrogadores hablaron durante horas con él y le hicieron saber que corría inminente peligro. Galileo terminó derrumbándose y fue sancionado como “vehemente sospechoso de herejía” (*vehementer suspectus*), cargo intermedio entre “levemente sospechoso” (*leviter suspectus*) y “violentamente sospechoso” (*violenter suspectus*).

El 16 de mayo de 1633 el grupo de cardenales se reunió con el papa; sólo faltaba redactar la condena. A Galileo aún le quedaba el escarnio público y además sus inquisidores deseaban destacar una sentencia tan importante contra una persona de gran renombre. El sitio donde anunciarían la victoria de la Iglesia debía ser un escenario grandioso, por lo que se eligió la basílica de los dominicos en el centro de Roma: Santa María sopra Minerva, muy cerca del Panteón y del Colegio Romano. El *Diálogo* fue prohibido mediante edicto público y Galileo fue condenado a arresto domiciliario por el resto de sus días.

Fue en su reclusión donde Galileo escribió la que tal vez sea su obra maestra. En 1638 presentó *Discursos y demostraciones matemáticas sobre dos nuevas ciencias*; las dos nuevas ciencias son la ciencia de materiales y la ciencia de la cinemática, esta última es la base de la mecánica moderna, que culminará con la gran síntesis newtoniana. También es impor-

tante señalar que Galileo fue el primero en escribir sus obras en italiano, no en latín, para que llegaran al gran público; en ese sentido, puede ser considerado el primer gran divulgador de la ciencia. Además, debido a la excelencia de su prosa, muchos especialistas de la lengua italiana lo reconocen como el mejor escritor italiano del siglo XVII.

Galileo, recluido en su casa de Arcetri, en las afueras de Florencia, perdió la vista cuatro años antes de su muerte, quizá a causa de las horas que había pasado mirando al Sol por el telescopio. Finalmente, el papa le permitió gozar de la compañía de un joven erudito, Vincenzo Viviani, quien el 8 de enero de 1642 anunció la muerte de Galileo.

Kepler, el matemático imperial

Tras la muerte de Tycho Brahe, Kepler fue nombrado matemático imperial, cargo que desempeñó en Praga entre 1601 y 1612, hasta la muerte de Rodolfo II. Fue el periodo más fructífero de su vida y le proporcionó el incomparable mérito de fundar también dos nuevas ciencias: la óptica instrumental y la astronomía física. Su obra magna, publicada en 1609, lleva por título *Nueva astronomía basada en la causalidad o física celeste derivada de las investigaciones de los movimientos de la estrella Marte fundada en las observaciones del noble Tycho Brahe*, que contiene las dos primeras de sus tres leyes planetarias.

La promulgación de las leyes de Kepler constituye un hito histórico; fueron las primeras “leyes naturales” en el sentido moderno: afirmaciones precisas y verificables acerca de las relaciones universales que gobiernan fenómenos particulares, expresadas en términos matemáticos. Separaron a la astronomía de la teología y la unieron a la física. Además, pusieron fin a la pesadilla que atormentaba a la cosmología durante los últimos dos milenios: la obsesión con la idea de esferas girando sobre otras esferas, y las sustituyeron por una visión de cuerpos materiales, similares a la Tierra, flotando libremente en el espacio, movidos por fuerzas físicas que actúan sobre ellos.

Con base en los datos de gran precisión obtenidos por Brahe (véase la Figura 4), Kepler se preguntaba por qué, si la fuerza que mueve a los planetas procede



Figura 4. Tycho Brahe.

del Sol, se insistía en que giraban en torno a un punto distinto del centro del Sol. Kepler respondió a la pregunta suponiendo que cada planeta estaba sujeto a dos influencias conflictivas: la fuerza del Sol y una segunda fuerza localizada en el propio planeta. Esta competencia ocasiona que unas veces se acerquen al Sol y otras se alejen de él. La idea de las dos fuerzas es el embrión de la fuerza de gravedad y de la inercia.

Kepler intentó hacer coincidir las inigualables observaciones de Brahe respecto de las posiciones de Marte con una órbita circular, pero no lo logró. Las posiciones observadas de Marte diferían de las que su teoría exigía en más de ocho minutos de arco. Ptolomeo y Copérnico podían permitirse despreciar una diferencia de ocho minutos debido a que sus observaciones eran exactas tan sólo con un margen de diez minutos.

Pero nosotros, que por la divina bondad hemos dispuesto de un observador tan exacto como Tycho Bra-

he, estamos obligados a reconocer este divino don y utilizarlo... En consecuencia, voy a tener que seguir el camino hacia esa meta según mis propias ideas. Porque si creyera que podía ignorar esos ocho minutos, hubiera elaborado mi hipótesis de acuerdo con ello. Pero puesto que no me resulta permisible ignorarlos, esos ocho minutos indican el camino hacia una completa reforma de la astronomía...

Tal y como señala A. N. Whitehead (1953, p. 3):

Por todo el mundo, en todas partes y en todos los tiempos, ha habido hombres prácticos, absortos en “irreductibles y obstinados hechos”; por todo el mundo, en todas partes y en todos los tiempos, ha habido hombres de temperamento filosófico absortos en el entretejer de los principios. Esta unión de un apasionado interés por los pequeños detalles con una idéntica pasión por la generalización abstracta es lo que constituye la novedad de nuestra sociedad actual.

Esta nueva actitud determinó el rumbo del pensamiento occidental en los últimos siglos y distinguió a la Europa moderna de todas las demás civilizaciones del pasado. El momento crucial de este cambio se encuentra expresado de forma dramática en la obra de Kepler. En el *Mysterium Cosmographicum* se fuerzan los hechos para encajarlos en la teoría. En la *Astronomia Nova* (véase la Figura 5) una teoría, edificada sobre años de labor y tormento, es inmediatamente rechazada debido a una discrepancia de ocho miserables minutos de arco. En vez de maldecirlos como una roca con la que se había tropezado, Kepler los transforma en la piedra angular de una nueva ciencia.

Lo que convirtió a Kepler en el primer constructor de leyes de la naturaleza fue su “introducción de la causalidad física en la geometría formal de los cielos”, y esto hizo que resultara imposible para él ignorar los ocho minutos de arco. Mientras la cosmología estuvo guiada por reglas puramente geométricas, independientemente de las causas físicas, las discrepancias entre teoría y hechos podían ser superadas insertando otra rueda dentro del sistema. En un universo movido por fuerzas reales eso ya no

era posible. Kepler llegó a estar muy cerca de la noción de la fuerza de gravedad; sin embargo, fue incapaz de dar el paso con el que llegaría Newton. La diferencia está en las matemáticas que Newton desarrolló y Kepler ignoraba.

En 1618 Kepler terminó de escribir su *Armonía del mundo* (*Harmonice Mundi*) y lo publicó al año siguiente (véase la Figura 5). En esta obra presentaba su tercera ley. Pero fue durante buena parte de la escritura de este libro cuando dedicó todo su esfuerzo a resolver un problema que, paradójicamente, nada tenía que ver con la armonía del mundo. Se abocó durante seis años (de 1615 a 1621) a defender a su madre del cargo de brujería.

La conflictiva anciana Katherine Kepler se vio envuelta en un problema que tuvo con una antigua amiga del poblado de Leonberg. El fondo de la historia tuvo que ver con la manía de la cacería de brujas, que había alcanzado su cúspide en la primera mitad del siglo XVII, tanto en las zonas católicas como en las protestantes de Alemania. En Leonberg, donde vivía la madre de Kepler, tan sólo en el invierno de 1615 fueron quemadas seis mujeres acusadas de ser brujas. Katherine fue sometida a reclusión y a penosos interrogatorios con la finalidad de que confesara el cargo de brujería, pero jamás lo hizo, ni siquiera cuando le fueron mostrados los instrumentos de tortura. Finalmente, luego de 14 meses de prisión, fue liberada el 4 de octubre de 1621, con la advertencia de no regresar a Leonberg, donde podrían lincharla. Kepler volvió a Linz para continuar con su trabajo, donde su madre, debilitada, falleció el 13 de abril de 1622.

Kepler también publicó la *Optica* en 1604 y la *Dioptrice* en 1610. Entre 1617 y 1621 escribió el *Epitome Astronomiae Copernicanae*. En 1627 presentó las *Tabulae Rudolphine*, que se usaron durante más de un siglo para calcular las posiciones de muchos planetas y estrellas. Además, en 1634 se publicó póstumamente su obra *Somnium, sive astronomía Lunaris* (*El sueño, o la astronomía de la Luna*), que, evidentemente, palidece ante la importancia científica que tienen sus otros libros, pero le permite ser considerado un pionero de la ciencia ficción o ficción científica.

Kepler murió el 15 de noviembre de 1630 en Ratisbona, Baviera; fue enterrado en el cementerio de

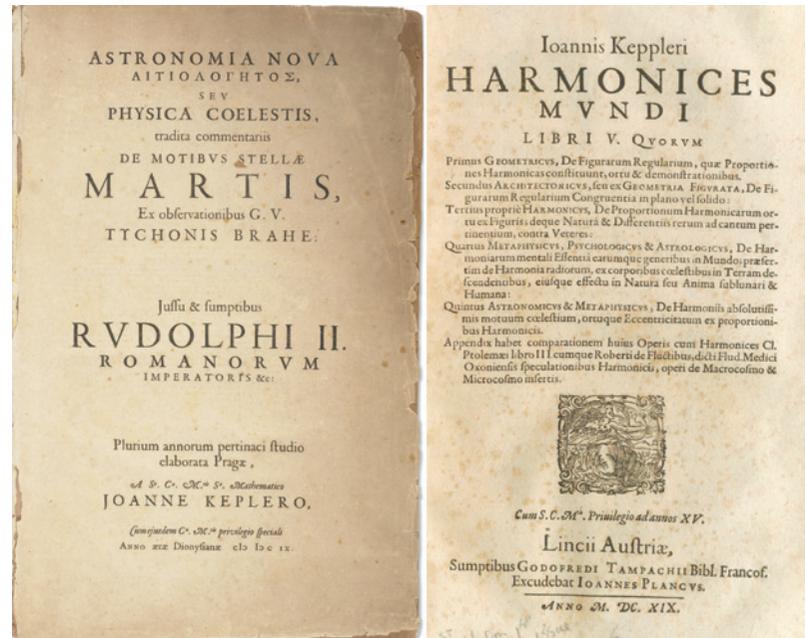


Figura 5. Portadas de los libros *Astronomia Nova* y *Harmonice Mundi*.

San Pedro, a las afueras de la ciudad, que fue destruido durante la Guerra de los Treinta Años. Aunque los huesos de Kepler fueron esparcidos, el epitafio que escribió para sí mismo se conserva: “*Mens eram coelos, nunc terrae metior umbras / Mens coelestium erat, corporis umbra iacet*” (Medí los cielos, ahora mido las sombras / Del cielo era la mente, en la tierra descansa el cuerpo).

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.
- Whitehead, A. N. (1953), *Science and the Modern World*, Cambridge, Cambridge University Press.

De fotógrafos a montañistas: los *paparazzi* del enlace químico

Sutil, escurridizo, como cualquier concepto científico, el enlace químico se rehusó muchos años a ser puesto en evidencia. Pero un grupo de fotógrafos, aventureros, montañistas de la ciencia, logró desentrañar sus secretos. Para ello, fue necesario fotografiar a las moléculas muy de cerca. Al interpretar esas fotos, se toparon con complicados relieves que encierran las propiedades del enlace químico.

Una historia de rupturas y reencuentros

Todo está hecho de materia. Los objetos que nos rodean, la ropa, los alimentos, nuestros cuerpos. Todo. Más aún, la materia está formada de diminutas partículas, llamadas átomos. Estos átomos se arreglan en infinidad de formas, colores y sabores, y le dan al mundo la cara que conocemos. La química se encarga de estudiar los mecanismos que regulan esas combinaciones y transformaciones entre los átomos. Para ello, esta ciencia se vale de un concepto muy útil: el enlace químico.

El enlace químico es la unión que existe entre dos átomos. Pero para entender esto, es necesario hacer un pequeño *zoom* al átomo. Al hacerlo, notaremos que cada átomo está formado de electrones que se mueven en torno a un núcleo, compuesto de protones y neutrones. Los electrones y los protones tienen carga opuesta y, por ello, se atraen. Por eso, los núcleos se acercan hasta cierta distancia, y los electrones se acomodan alrededor de ellos, manteniendo unido al átomo.

Estos arreglos de los núcleos conforman las moléculas que nosotros conocemos y de las cuales está constituida toda la materia; es decir, de lo que estamos hechos nosotros mismos y todo lo que nos rodea, lo que ingerimos en los alimentos o las medicinas y lo que respiramos. Y los responsables de que esas estructuras de núcleos sean resistentes son los electrones.

Pero en ocasiones algo externo trata de separar a un par de núcleos con tal fuerza que ni los electrones son capaces de mantener la estabilidad. Al separarse los núcleos, quedan libres uno del otro; sin embargo, eventualmente se encuentran



con otros núcleos, se acercan de nuevo y los electrones se reacomodan para volver a pegar esta nueva unión, este nuevo enlace. Al formar nuevos enlaces, se producen otras sustancias químicas, nuevas o ya conocidas. Por lo tanto, entender las reacciones químicas es conocer este proceso de uniones y rupturas.

Después llegaron los físicos

La química estudia todos los aspectos involucrados en la ruptura de un enlace químico y en la formación de uno nuevo: desde la manera en que se rompe el enlace, hasta las condiciones que permiten que el nuevo enlace perdure para aprovechar la nueva sustancia formada. Algo que nos interesa desde siempre es conocer cuánto esfuerzo hay que imprimirle a cada unión química para romperla. Para lograrlo, la física nos provee de una manera sencilla, pero eficaz, de medir lo fácil o difícil que es romper un enlace químico: la energía.

En términos prácticos, la energía cuantifica la capacidad de un agente externo para mover una partícula. Este concepto es muy útil porque se trata de la “moneda de cambio” de los fenómenos físicos. Cuando se acercan dos sistemas físicos lo suficiente, usualmente intercambian su energía. Por lo tanto, si queremos romper un enlace, la física nos dice que hay que acercar un objeto con una energía mayor para que done su energía a nuestro enlace y entonces seamos capaces de separar los núcleos en cuestión.

A pesar de que la estrategia estaba clara, fueron necesarios muchos años para que se llegara a una descripción precisa y útil de los núcleos y los electrones. Científicos como Niels Bohr (1885-1962), Erwin Schrödinger (1887-1961), Werner Heisenberg (1901-1976) y Louis de Broglie (1892-1987), entre otros, desarrollaron las bases de la física cuántica, la cual nos permite entender las maravillas del mundo de los objetos muy pequeños. Pero hoy nos concentraremos en algo muy particular: ¿qué nos puede decir la física cuántica de los enlaces químicos? La respuesta es: si nosotros proporcionamos un arreglo de núcleos, la física cuántica nos dice cómo se acomodan los electrones alrededor de los núcleos, y cuál es la energía de ese arreglo. Por lo tanto, si queremos estudiar la ruptura del enlace A-B, vere-

mos dos arreglos: uno en el que los núcleos A y B están cercanos entre sí, y otro arreglo en el que los núcleos están tan alejados que, para fines prácticos, están libres uno del otro. La diferencia entre esas energías es, precisamente, la energía necesaria para alejar esos núcleos y romper el enlace.

Ya hemos hablado de las bondades de la energía; sin embargo, no todo es miel sobre hojuelas. En la mayoría de las reacciones químicas, el proceso involucra la ruptura y formación de múltiples enlaces. Si le proporcionamos a la física cuántica el arreglo de los núcleos cuando forman los reactivos, y luego el arreglo cuando forman los productos, entonces la diferencia es la energía necesaria para llevar a cabo la reacción química completa. Es decir, la energía sólo proporciona una descripción global del proceso, pero no nos dice cuál es el costo de romper y formar cada uno de los enlaces involucrados. Esta limitación dejó de lado el concepto de enlace... hasta que la química se involucró en el problema.



Erwin Schrödinger

Y luego llegaron los químicos

Linus Pauling (1901-1994), inconforme con las limitaciones antes descritas, decidió proponer una descripción de los sistemas químicos que unía tanto la visión desde la física de la energía como las ideas químicas sobre el enlace. Este trabajo es conocido como la teoría del enlace de valencia. Su idea fundamental era resolver el problema de la física cuántica, pero partiendo de un supuesto previo: cuando dos núcleos distintos se acercan entre sí, sus electrones participan únicamente de dos maneras. O bien los electrones se dirigen hacia el otro núcleo, abandonando completamente su núcleo original, o bien se comparten, llenando el espacio que separa a los dos núcleos. El primer caso se denominó enlace iónico; y el segundo, enlace covalente.

De esta manera, fue posible utilizar los métodos de la física cuántica, pero a partir de una comprensión química del proceso: cada elemento químico cuenta con una cantidad específica de electrones. Conocer los procesos químicos consiste en entender las reglas del “préstamo” y “compartimiento” de electrones, que posteriormente se llevaría a los cálculos finos de la física cuántica.

Esta estrategia resultó útil para explicar muy bien algunos procesos químicos; sin embargo, para otros sistemas dio lugar a explicaciones incompletas, pues muchos enlaces no son simplemente iónicos o covalentes: a veces los enlaces tienen un poco de ambas cualidades y crean una amplia gama de posibilidades que están fuera de esta descripción. Para muchas personas en la comunidad química, el enlace químico pasó de ser el instrumento fundamental para entender las reacciones químicas, a ser sólo una imagen simple que ayuda a dar los primeros pasos para estudiar un sistema químico, pero que pierde su importancia frente a los métodos modernos y sofisticados de la física cuántica. Era necesario reivindicar el rol del enlace químico, retomar la visión de Pauling y llevarla más allá.

Al final, trabajaron todos juntos

A continuación, veremos una parte del panorama actual en torno al enlace químico. Esto ha sido un logro de muchas personas, que tuvieron que revisar los cimientos de la física cuántica para encontrar una

manera de explicar la realidad, en la cual las descripciones de la física y de la química se reconciliaran. Para entender uno de los capítulos de esta historia, es necesario ir al principio, cuando Richard Bader (1931-2012) decidió analizar el problema anterior desde la perspectiva de un experimento muy particular: en vez de suponer el arreglo de los electrones para hablar de donación o compartimiento, ¿por qué no determinar dónde se encuentran realmente los electrones en una molécula? ¿Es posible recuperar las ideas de Pauling al hacerlo? Para responder estas preguntas, es necesario hacer un experimento muy especial: tratar de fotografiar al electrón.

Cómo fotografiar al electrón

Para tomar una fotografía convencional, es necesario que la luz incida sobre una persona o un paisaje. El método consiste en recolectar la luz reflejada, que contiene toda la información de la imagen: los colores, las profundidades, las formas. Esta luz se retiene en una placa, en un papel o en un sensor dentro de un teléfono celular; después de algunas reacciones, la imagen queda impresa (o guardada en una memoria digital), y nos quedamos con un recuerdo perpetuo del momento.

Pero cuando queremos retratar al electrón con esa misma estrategia, es necesario tomar en cuenta unos cambios ligeros: primero, que el electrón es prácticamente invisible y, segundo, que los electrones ¡nunca se quedan quietos!

Te veo, no te veo

En el mundo de la fotografía, existen muy diversos efectos especiales. Uno de ellos consiste en retratar a una persona en un cuarto cuya iluminación ha sido modificada; esto es, cuando la luz que proviene del foco tiene un color peculiar. Esto permite retratar con mayor detalle algunos aspectos de la persona, y también hace que algunos colores “originales” sean muy poco perceptibles o desaparezcan.

Al fotografiar al electrón, sucede algo similar. Si intentamos utilizar luz convencional, en un “estudio” donde tenemos al electrón encerrado para su sesión fotográfica, el resultado de las fotografías será nulo. El

electrón es invisible ante esta luz. En parte, la razón de esto es que el electrón es tan pequeño, y su movimiento es tan intenso, que la luz de la lámpara no lo detecta.

Para que la luz detecte un objeto en cuestión, es necesario que pueda interactuar con dicho objeto. La luz visible está compuesta de ondas, las cuales tienen una determinada energía que, al contacto con el objeto, se transfiere. Resulta que el electrón, al moverse, posee una energía mucho mayor a la de la luz que incide sobre él; tanto, que la luz no es capaz de interactuar ni de detectar al electrón. Sería como querer golpear a una mosca lanzándole bolas de papel. La diferencia entre la velocidad (y energía) de las bolas de papel y de la mosca es tan alta que es prácticamente imposible que coincidan y que el papel sufra un cambio significativo al chocar con la mosca para que podamos detectar a la mosca estudiando las bolas de papel que le lanzamos.

Por lo tanto, fotografiar al electrón con luz convencional no es posible. Es necesario buscar un tipo de luz especial, cuya energía sea tan alta que compita con la del electrón y esto les permita interactuar. La luz que buscamos se trata de los rayos X. La disciplina encargada de la tecnología para detectar y fotografiar partículas de muy diversos tamaños y propiedades se denomina espectroscopía.

No te quedes quieto, arruinas la foto

Para tomar una foto convencional, también es necesario que la persona o el objeto se quede en una posición estática mientras la placa recoge la luz y genera la imagen. Si se mueve, la imagen que obtenemos es difusa, y la foto se ha arruinado. La cuestión es que el electrón es una partícula en perpetuo movimiento. De hecho, la física cuántica establece que no se puede seguir el movimiento del electrón; es decir, resulta imposible conocer su recorrido. En el mejor de los casos, es posible captar al electrón en diferentes instantes de tiempo. Como en otras ocasiones en la historia de la ciencia, esta limitación, que surgió como una enorme barrera inevitable, a la postre se convirtió en un reto que fue enfrentado desde una perspectiva distinta.

En términos simples, el reto es tomarle una fotografía al electrón. Sin embargo, cualquier sistema químico está compuesto de multitud de electrones

que se mueven todo el tiempo. Es como querer tomar una fotografía panorámica aérea de un grupo de niños jugando en el recreo: ninguno se queda quieto, y no se logra distinguir a un niño del otro. Sin embargo, pronto la comunidad física se dio cuenta de que existen dos diferencias fundamentales entre retratar a los niños y a los electrones. Primero, los niños podrían distinguirse e identificarse si se hace suficiente *zoom*, cosa que no puede suceder al fotografiar electrones. Segundo, los niños se mueven tomando decisiones impredecibles para el fotógrafo; por momentos se detienen, cambian de juego, todos corren en una dirección y, segundos más tarde, en otra. No hay un patrón que se distinga a menos que el fotógrafo baje a convivir con ellos y entienda las reglas del juego.

En cambio, los electrones forman siempre un patrón. De hecho, la física cuántica predice que cuando un sistema químico se equilibra, los electrones se siguen moviendo, pero forman un patrón que se mantiene. Por lo tanto, es mejor concentrar nuestros esfuerzos en tener un retrato del patrón que forman los electrones como conjunto, en vez de concentrarnos en un electrón a la vez. A ese patrón se le llama densidad de partículas, y como las partículas estudiadas son electrones, se le denomina densidad electrónica.

Para retratar la densidad de los electrones, es necesario tomar múltiples fotografías individuales y luego sobreponerlas para observarlas juntas. Al hacerlo, se notará que en algunas regiones siempre hay multitud de electrones, mientras que otros lugares se encuentran casi siempre vacíos. Al tomar más y más fotografías, el patrón se hace más claro, y esto nos permite saber con precisión cuál es la probabilidad de fotografiar a los electrones en cualquier punto del espacio. Al final del día, la imagen obtenida es un mapa que nos muestra en qué regiones del sistema químico hay más o menos electrones. Pronto veremos que ésta es toda la información que necesitamos para restablecer el puente entre el modelo químico de Pauling y los resultados de la química cuántica.

■ **Revelar la fotografía: un paisaje escabroso**

■ El “negativo” de la densidad electrónica se nos presenta como manchas de distinta intensidad. A mayor

intensidad de la mancha, mayor densidad de los electrones en ese punto. Para que esta imagen nos revele toda la información que deseamos desentrañar, es necesario buscar una manera sencilla de interpretarla.

En primer lugar, hay que aclarar que el mapa de la densidad electrónica son manchas en tercera dimensión (3D), como si fuera un holograma que hoy es tan común en las películas. Es similar a pensar en la densidad de una nube que está confinada en un cubo tridimensional. Para hacer más sencillo el estudio de estas manchas de la densidad electrónica, pensemos solamente en la densidad en un plano que corte al sistema. Por ejemplo, en el caso de un sistema químico plano, como el benceno, pensemos en el plano que atraviesa los núcleos de carbono e hidrógeno. Esto nos facilita la labor de entender la travesía que describiremos a continuación (véase la Figura 1). Si después de todo el estudio encontramos algo interesante, será posible estudiarlo en el mapa tridimensional completo, con un poco (o mucho) de imaginación.

Montañas y valles

Cuando se estudia la densidad electrónica en un solo plano, es posible visualizar el mapa de la densidad electrónica como un mapa topográfico. Es decir, podemos imaginar que nos encontramos en un lugar desértico, vacío, en el cual la altura del terreno corresponde al valor de la densidad en ese punto. Siguiendo con el ejemplo del benceno y el mapa del desierto, haremos un ejercicio mental.

En primer lugar, hay que decir que estamos estudiando el benceno, una molécula cuya fórmula es C_6H_6 . Nos visualizaremos caminando dentro del mapa de su densidad electrónica. Recordemos que este lugar tiene un relieve muy interesante: en las regiones donde la densidad electrónica es mayor, el suelo está a una mayor altura, y viceversa. Existen 12 puntos en los que la densidad es máxima; en otras palabras, el paisaje tiene 12 montañas, colocadas en dos capas en un arreglo hexagonal (véase la Figura 2).

Un topógrafo experto en este tipo de terrenos de la densidad de los electrones sabe perfectamente cómo interpretar esas montañas. Cada una corresponde a la ubicación de un núcleo atómico. Esto sucede porque la densidad electrónica es máxima en la cercanía de los núcleos; recordemos que los núcleos tienen carga opuesta a los electrones, y aunque los electrones se mueven muy rápido, los atraen.

Este topógrafo encuentra las 12 montañas, de las cuales, seis núcleos son de carbono y seis son de hidrógeno, colocados en un arreglo circular. Al centro del círculo, se encuentra un gran valle, una porción donde la altura es mínima (véase la Figura 2). Este lugar arroja información interesante sobre un efecto del benceno llamado aromaticidad. Pero no intentemos volar antes de correr, sobre todo en esta aventura del montañismo químico. En esta ocasión, dejaremos de lado el centro de nuestro benceno, pues nos interesa más lo que sucede en la cima de las montañas. Para continuar con nuestra exploración,

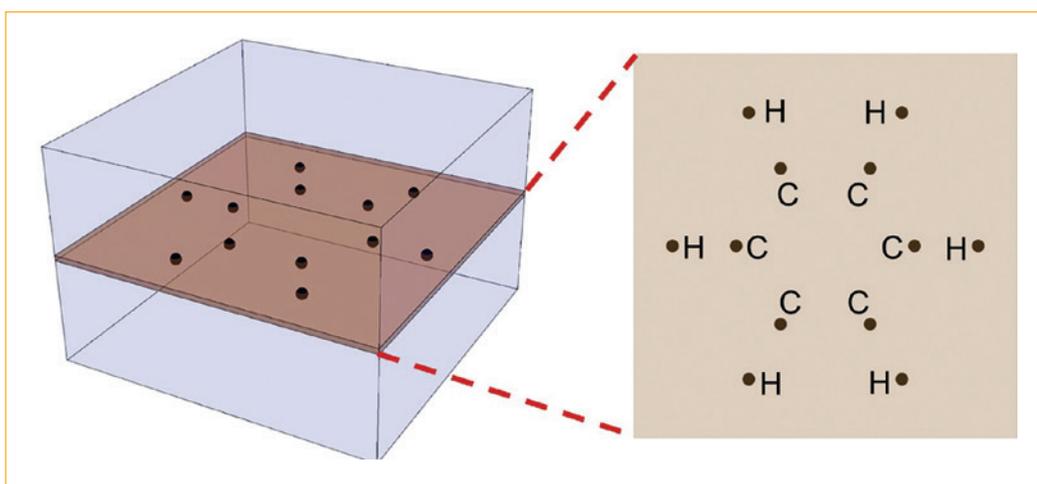


Figura 1. Para estudiar a la molécula de benceno, la colocamos en un espacio tridimensional. Luego, estudiaremos un segmento de todo el espacio, un corte que pasa por todos los núcleos de carbono e hidrógeno. Fuente: elaboración propia.

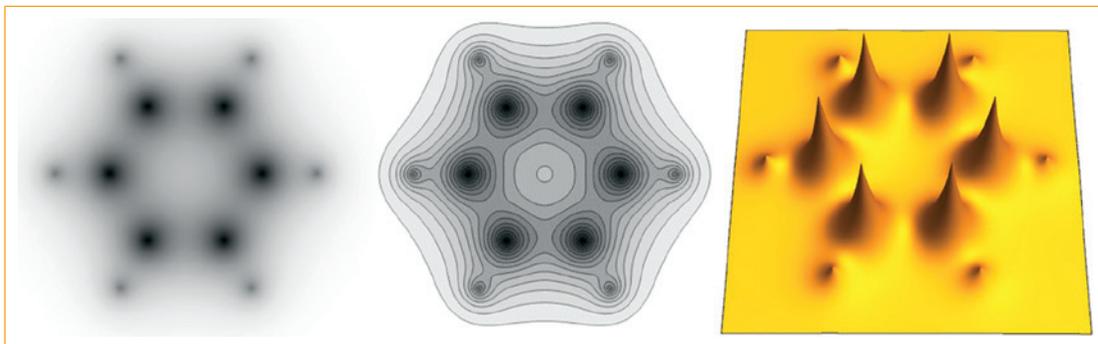


Figura 2. Densidad electrónica del benceno; en el extremo de la izquierda se muestra la densidad como un patrón de zonas oscuras (de alta densidad) y claras (de baja densidad). Para interpretarlo, se separa el mapa en regiones que tienen la misma densidad, como si fuera un mapa topográfico, mostrado al centro. Es posible representar la densidad en cada punto como una altura, y así obtener un paisaje tridimensional, como se aprecia en el extremo derecho. Fuente: elaboración propia.

vayamos allí y estudiemos cómo se ve la vida en la cima de la densidad electrónica.

El enlace es el camino

Estamos en la cima de la densidad electrónica. A nuestro alrededor, observamos una pendiente muy escarpada. Debemos caminar con cuidado, tratar de no tirar ninguna pertenencia, porque de hacerlo caerá sin detenerse, hasta el fondo. Pero como somos científicos o, lo que es lo mismo, exploradores y aventureros, surge la curiosidad de saber qué pasaría si caemos por la ladera de estas montañas.

En este paisaje del benceno, pronto nos damos cuenta de que cada montaña ofrece pocas alternativas. Si estamos parados en una montaña de carbono, entonces al tirar un objeto de prueba (digamos, una canica), lo más probable es que suceda lo siguiente: si la tiramos hacia el centro del círculo, entonces la canica rodará hasta el centro, hacia el lugar donde habíamos encontrado el valle central del benceno; o bien, si la tiramos hacia afuera del círculo, la canica rodará lejos de todas las montañas, lejos de todo, pues la densidad sigue disminuyendo siempre a medida que nos alejamos más y más de nuestro benceno. En pocas palabras, el destino de una canica que cae es acabar en el centro del benceno, o alejarse al infinito.

Sin embargo, al seguir observando la escarpada de la montaña, notamos algunas regiones muy pequeñas, pero peculiares. Parecen caminos que salen de la cima de la montaña de carbono; específicamente, son tres caminos. Si soltamos la canica justo en estos caminos, notamos que la canica no se va al

valle central ni se aleja del benceno. En vez de eso, la canica rueda siguiendo uno de los caminos, y nosotros la seguimos. Continuamos bajando hasta que la canica pasa por una altura mínima en ese camino. Como la canica lleva cierta velocidad, sigue su curso, pero ahora va subiendo por un camino escarpado. Empezamos a preguntarnos cuándo terminará el recorrido de esta canica de prueba.

Al caminar cuesta arriba siguiendo a la canica, empezamos a pensar en lo peculiar de la trayectoria. Sin darnos cuenta, la canica se detiene. Tomamos la canica, alzamos la vista y, por primera vez, notamos que nos encontramos nuevamente en la cima de una montaña. ¡Hemos llegado a otra montaña de carbono! Para ser exactos, hemos llegado a la montaña adyacente a aquella de la que soltamos la canica.

Miramos hacia atrás, el camino recorrido, y notamos algo interesante: sin fijarnos hemos caminado de una montaña a la siguiente, pero seguimos un camino asombroso. De no haber puesto los ojos en la canica, habríamos notado que teníamos una vista espectacular: hacia un lado del camino, veíamos el valle central y, hacia el otro, la llanura sin fin, que baja lentamente. Todo el paisaje está por debajo de nosotros. Hemos caminado de una montaña a la otra siguiendo la trayectoria de mayor altura posible.

Regresamos a la montaña de carbono de partida, y como recordamos que había otros dos caminos que podíamos seguir, repetimos el experimento. En el segundo camino, la canica llega a otra montaña de carbono; pero en el tercer intento, la canica llega a una montaña de hidrógeno. Por más que buscamos, no

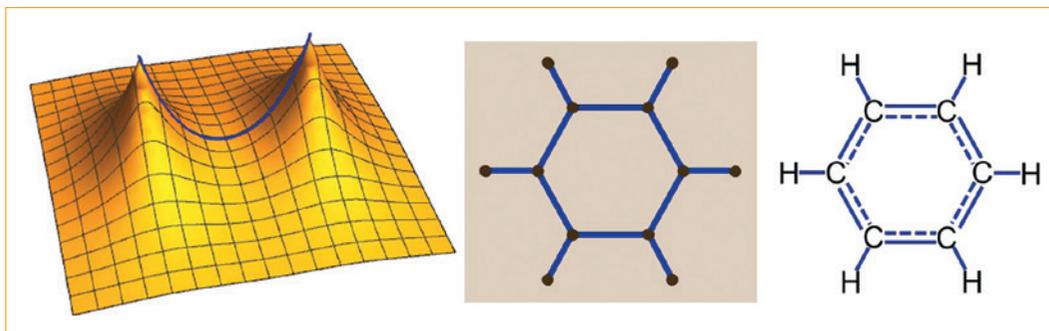


Figura 3. Caminos de enlace: en el extremo izquierdo, se muestra la trayectoria que une a dos carbonos adyacentes, la cual no tiene pendiente en la dirección que apunta al centro del benceno, por lo que no cae en dirección al centro. Fuente: elaboración propia.

hay otros caminos que salgan de la montaña de carbono donde empezamos. Estos caminos unen a nuestro carbono con otros tres núcleos, al parecer. Todo esto suena a algo que vale la pena estudiar sistemáticamente en el resto de los núcleos de nuestro benceno. Al repetir el experimento en la cima de todas las demás montañas, encontramos todos los caminos posibles. Éstos forman un arreglo que se muestra en la Figura 3.

■ ¿El final del recorrido?

■ Al observar los caminos en este paisaje del benceno, algo resulta evidente: las líneas y los puntos corresponden a una imagen que nos resulta familiar, que hemos visto en la escuela, en la clase de química. Es la estructura de la molécula de benceno. Pero en el pizarrón, las líneas del dibujo no corresponden a ningún valle, a ninguna montaña ni a ningún camino. Son algo más abstracto: estas líneas indican el enlace entre los carbonos y los hidrógenos en la molécula de benceno. Son los electrones compartidos que Linus Pauling estudiaba.

Al final del día, parece ser que Pauling tenía algo de razón: es posible relacionar la fuerza de un enlace con la densidad de los electrones en el espacio entre los núcleos, como si esta densidad se relacionara con la cantidad de electrones que participan en el enlace. Sin embargo, ahora esta descripción permite incluir también otro tipo de enlaces o interacciones, que anteriormente parecían parte del terreno de la imaginación química.

Al continuar la búsqueda de los caminos de enlaces químicos, se forma la estructura mostrada en el

centro de la Figura 3. Esta red de caminos corresponde a la estructura química del benceno, que aprendimos en la escuela. Pero en los caminos que encontramos no es posible notar si un camino corresponde a un enlace doble o sencillo. Nos damos cuenta de que los montañistas de la densidad electrónica se enfrentaron a este otro reto. Así, muchos conceptos químicos pueden asociarse a descripciones puramente geométricas, como las que acabamos de mencionar. Por ello, año con año se estudian nuevas y mejores maneras de entender el enlace químico.

Empezamos nuestra aventura sobre un mapa para imaginarnos cómo se vería la vida desde el panorama de la densidad electrónica. Al explorarlo, sin querer, hemos caminado por encima del enlace químico. Ahora que sabemos cómo es el terreno que estamos pisando, quizá pensemos que deberíamos llevar los tenis limpios la próxima vez, no sea que dejemos sucios los caminos que mantienen al benceno y a toda la materia unida y funcionando como la conocemos.

■ Ulises Torres Herrera

Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México.
ulisestorresh@quimica.unam.mx

■ Lecturas recomendadas

- Bader, R. F. W. (1994), *Atoms in molecules: a quantum theory*, Oxford, Clarendon Press.
- Chamizo, J. A. (1995), "Linus Pauling...: el químico más importante de este siglo", *Educación Química*, 6(1): 64-70.
- Pauling, L. (1960), *The nature of the chemical bond*, Ithaca, Cornell University Press.

Rubén Rodrigo López Salazar y Luis Olivares Quiroz

Liposomas, de la física biológica a la medicina molecular

Los liposomas son pequeñas vesículas esféricas con la capacidad de encapsular sustancias tan diversas como medicamentos, genes y etiquetas para la imagenología médica. Actúan como mensajeros que transportan los compuestos químicos al lugar indicado, protegen su carga del exterior y evitan dañar a los tejidos sanos. Los liposomas representan el futuro de las terapias avanzadas y la medicina.

Propiedades principales de los liposomas

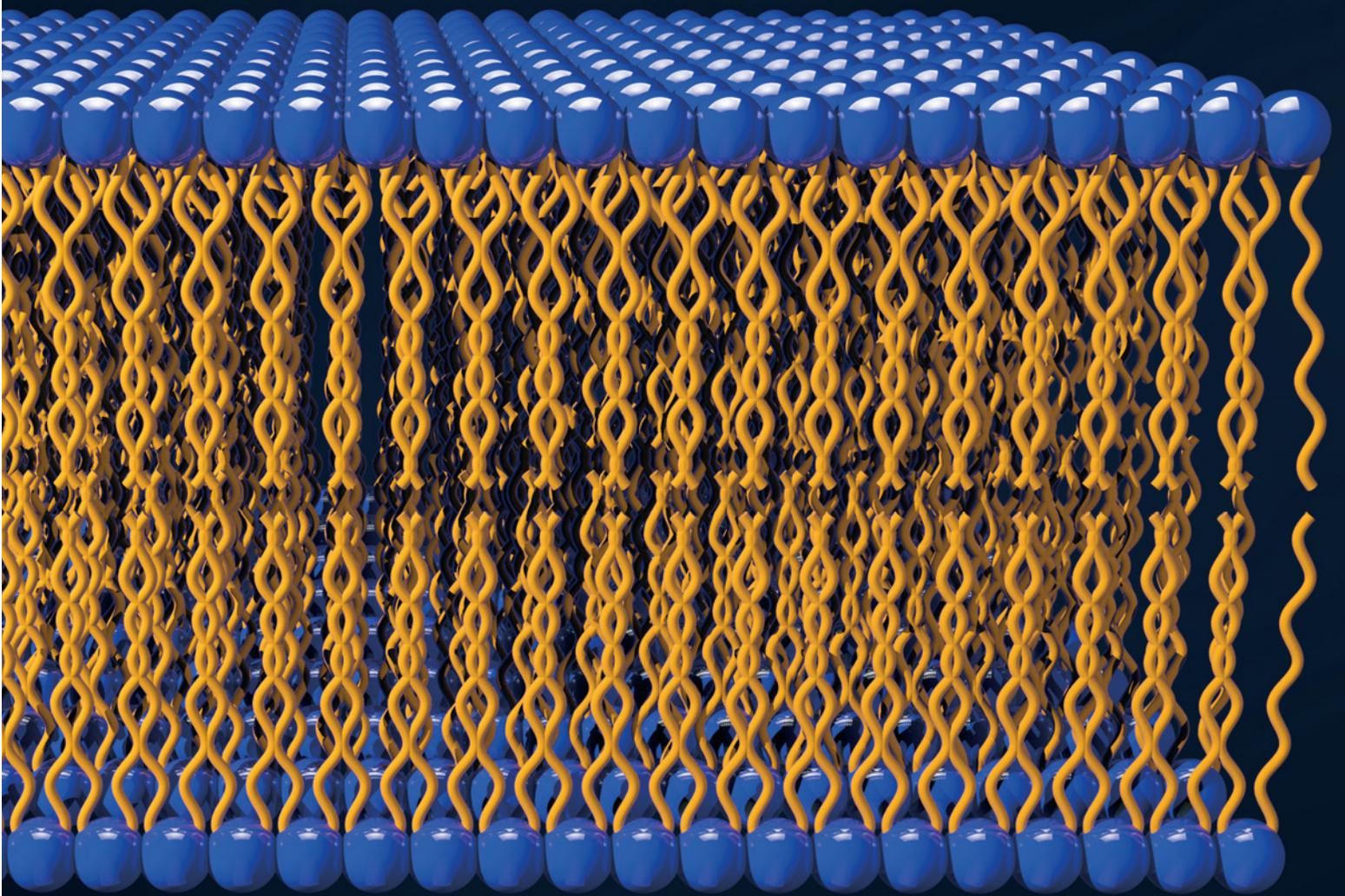
Han pasado más de 50 años desde la primera descripción de los sistemas lipídicos, mejor conocidos como liposomas (Bangham y cols., 1965); durante este tiempo, investigadores de todo el mundo han estudiado sus propiedades. Se conoce como liposomas a un conjunto de vesículas formadas por lípidos, por lo general, **fosfolípidos**. La palabra *liposoma* viene del griego: *lipo*, que significa “grasa” y *soma*, “cuerpo”. Actualmente, los liposomas tienen diferentes aplicaciones, desde los sistemas inteligentes de liberación de fármacos, conocidos como nanomedicamentos, hasta para silenciar genes dentro de las células.

En su forma básica, los liposomas son descritos como estructuras esféricas, organizadas en una doble capa de fosfolípidos. Estos últimos tienen forma de hebra y cuentan con una cabeza hidrofílica, que tiene una gran afinidad por las moléculas de agua, y una cola hidrofóbica, la cual, por el contrario, evita el contacto con el agua (véase la Figura 1).

Una de las características más notables y con mayor impacto es la capacidad de los liposomas para mantener aislado un compuesto químico del medio exterior (por ejemplo, del citoplasma celular). Esta propiedad, combinada con una alta compatibilidad con los organismos vivos, otorga a los liposomas la capacidad de encapsular una gran variedad de sustancias, como medicamentos, proteínas y material genético (ADN y ARN), las cuales, una vez encapsuladas, pueden ser transportadas por el torrente sanguíneo o por otros mecanismos para posteriormente ser liberadas en regiones específicas del cuerpo.

Fosfolípidos

Componentes principales de la membrana celular; estas moléculas están conformadas por un glicerol que se conecta a un grupo fosfato y dos cadenas de ácidos grasos.



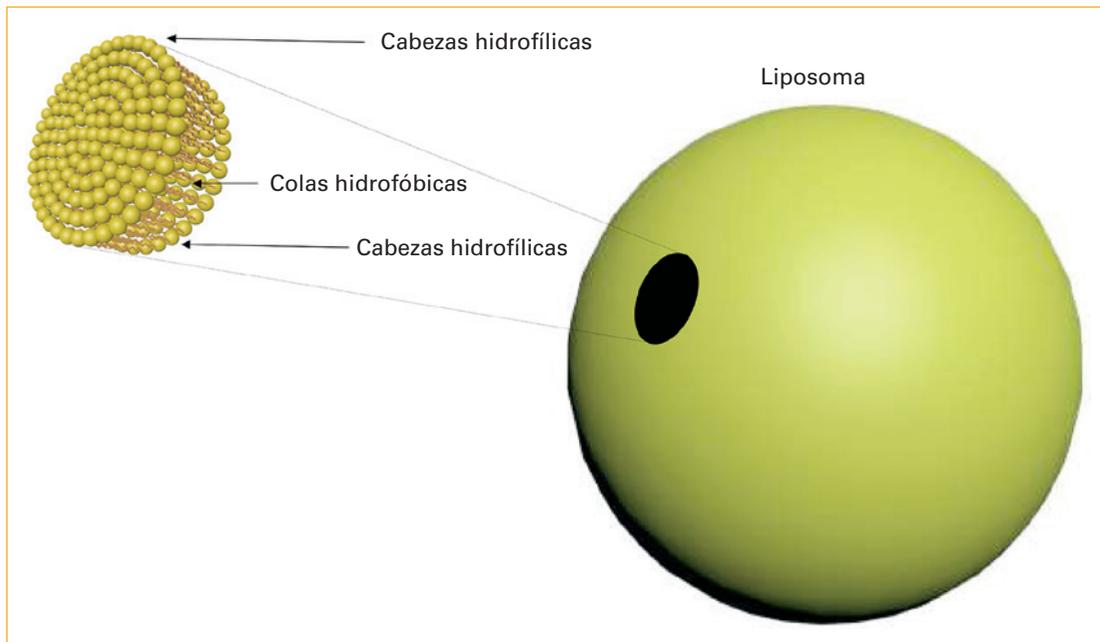


Figura 1. Liposoma y corte de la bicapa lipídica: tanto en el exterior como en el interior se encuentran las cabezas hidrofílicas; las colas hidrofóbicas están ubicadas entre las cabezas hidrofílicas. Estos dos sitios pueden ser utilizados para encapsular medicamentos. Fuente: elaboración propia.

Imaginemos una naranja: la cáscara sería la doble capa lipídica y los gajos son el contenido que queremos transportar; la cáscara protege al contenido. Es posible encapsular diversos tipos de sustancias tanto en el interior de los liposomas como entre la doble capa lipídica; en la analogía de la naranja, esto quiere decir que podríamos integrar sustancias en la misma cáscara. Además, se puede modificar la superficie de los liposomas para que, mediante los mecanismos o interacciones adecuadas, puedan ser dirigidos a tejidos específicos en el organismo.

Los liposomas se clasifican por su tamaño, función o composición (véase la Tabla 1). Una de las características físicas que permite describir a los liposomas es su lamellaridad, la cual se refiere a la cantidad de dobles capas lipídicas que contienen.

■ **Métodos de fabricación de liposomas**

■ La construcción y el diseño en el laboratorio de los liposomas se ha inspirado en estructuras que ya existen en los seres vivos. Estas estructuras, conocidas

Tabla 1. Clasificación de los liposomas por sus características (Pattni, y cols., 2015)

Por su lamellaridad y tamaño	Por su composición
Vesículas multilamelares (VML) >500 nm	Liposomas convencionales
Vesículas olilamelares (VOL) 100-1 000 nm	Liposomas pegilados (se agrega una modificación en la superficie de los liposomas para tener mayores tiempos de circulación al ocultar su presencia en el cuerpo humano y evitar su eliminación)
Vesículas enormes unilamelares (VEU) >1 000 nm	Liposomas catiónicos usados en transfección; es decir, la introducción de ácidos nucleicos en las células
Vesículas grandes unilamelares (VGU) >100 nm	Sensibles a estímulos exteriores (por ejemplo, cambio de pH)
Vesículas pequeñas unilamelares (VPU) 20-100 nm	Inmunoliposomas (químicamente se incorporan anticuerpos en la superficie que ayudan a los liposomas a localizar de manera específica ciertos tejidos; por ejemplo, tumores)
Nanopartículas liposomales (NPL) 20-100 nm	Liposomas para imagenología médica

como vesículas, son capaces de encapsular macromoléculas orgánicas de diversos tipos. Estas vesículas incluyen a los lisosomas, los endosomas, los exosomas y las membranas celulares, entre otras.

En forma espontánea y bajo ciertas circunstancias, los lípidos forman liposomas, pero en el laboratorio muchos liposomas se sintetizan con lípidos modificados que no existen de manera natural y que son capaces de emitir fluorescencia, por ejemplo, o bien pueden contener agregados bioactivos con diversos usos en imagenología, **transfección** y liberación de fármacos.

Los avances científicos en los últimos 50 años han hecho de la fabricación de liposomas una de las áreas más prometedoras en las nanociencias, debido a su impacto biomédico y biotecnológico (Pattini y cols., 2015). La capacidad de los liposomas de encapsular diversas sustancias está intrínsecamente relacionada con las propiedades fisicoquímicas de su superficie, dado que es posible agregar moléculas o compuestos que son capaces de identificar sustratos específicos y asociarse a ellos.

En uno de los métodos estándares de fabricación de liposomas, en una primera fase, se utiliza un solvente orgánico como el etanol con fosfolípidos disueltos y se mezcla con agua, que es un solvente polar. Ante el cambio de polaridad causado por la difusión del etanol en el agua, los fosfolípidos forman agregados en forma de discos; después, cuando la polaridad alcanza un punto crítico –y para reducir la exposición de las colas hidrofóbicas al agua–, los fosfolípidos se autoensamblan en esferas, al do-

blar la estructura en forma de disco (véase la Figura 2). Esto incrementa, primero, la energía libre del sistema debido a las contribuciones de la energía de doblado y, después, la disminuye a medida que las orillas desaparecen (Patil y Jadhav, 2014).

En un segundo método, el solvente orgánico en el cual están disueltos los lípidos se evapora y deja capas muy delgadas y secas en el fondo del recipiente. Después, se agrega un solvente polar (por ejemplo, agua) y la mezcla es agitada; de esta manera, las capas sucesivas de lípidos son removidas del fondo del contenedor y se autoensamblan en forma de liposomas (véase la Figura 3).

Transfección

La introducción de ácidos nucleicos en las células.

Liposomas para localizar tumores y tejidos enfermos

Los liposomas pueden localizar tumores y tejidos enfermos por medio de mecanismos pasivos y activos. Un mecanismo pasivo es aquel que toma ventaja de la geometría y dimensiones de las nanopartículas y del tejido objetivo para lograr una máxima acumulación. En contraste, los mecanismos activos usan atracciones intermoleculares para unir una nanopartícula con un sustrato de manera específica.

Un mecanismo pasivo ampliamente utilizado en aplicaciones médicas aprovecha los espacios formados por el crecimiento descontrolado de nuevos vasos sanguíneos en los tumores sólidos. Estos espacios permiten que los liposomas que circulan en la sangre puedan penetrar los tumores de manera selectiva; para que un liposoma pueda utilizar este

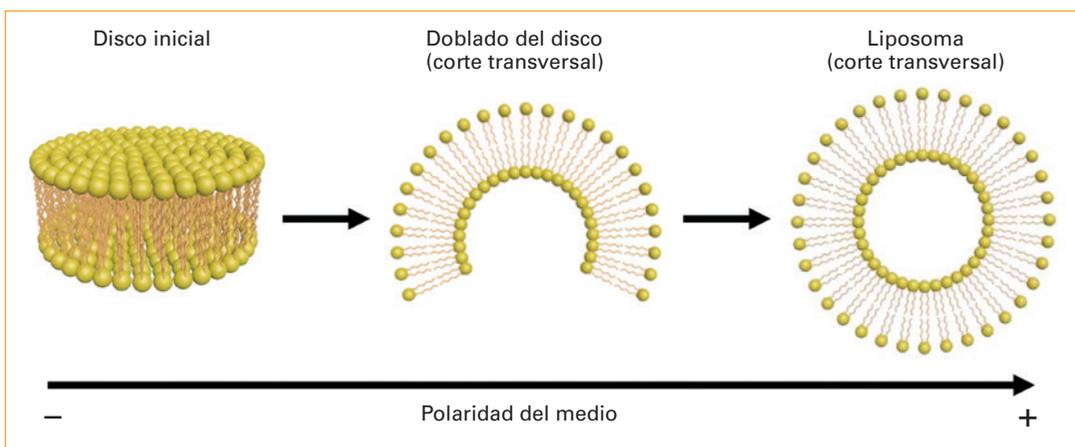


Figura 2. Los lípidos primero forman una doble capa lipídica en forma de disco; después se cierran en forma de esferas, debido al aumento de la polaridad del medio. Fuente: elaboración propia.

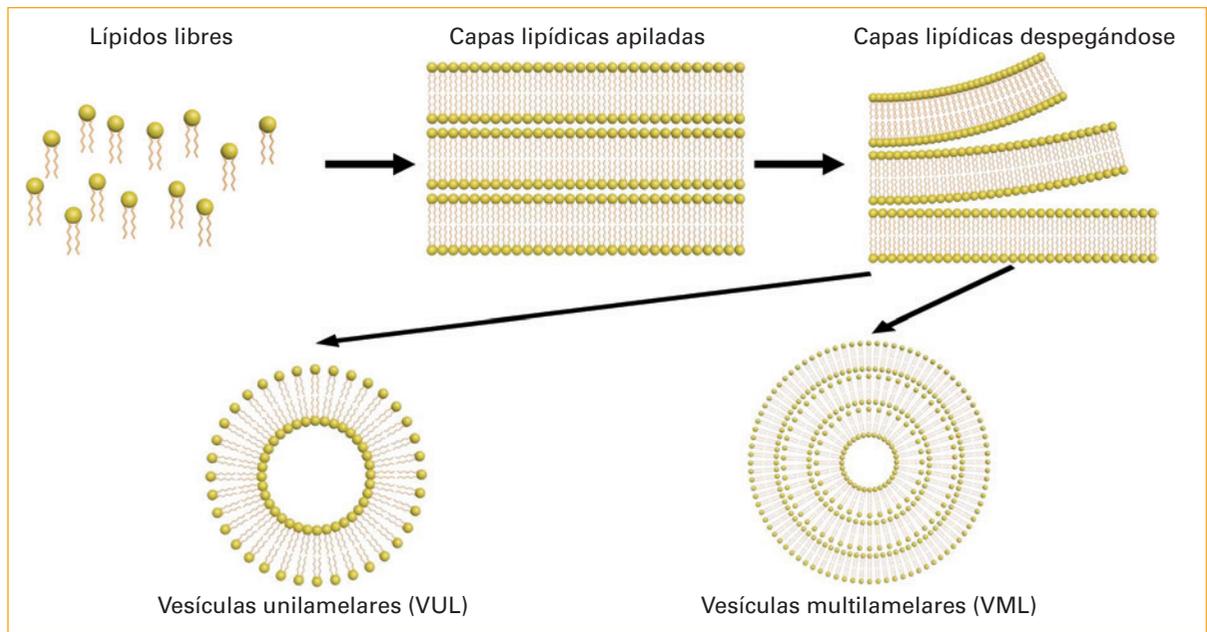


Figura 3. Los lípidos libres primero forman capas lipídicas apiladas en el fondo del recipiente; una vez que el solvente es removido, estas capas se despegan al ser rehidratadas y forman vesículas unilamelares o multilaterales. Fuente: elaboración propia.

mecanismo, su diámetro debe ser alrededor de 100 nanómetros (Matsumura y Maeda, 1986), lo cual es unas mil veces más pequeño que el grosor de un cabello humano. Este mecanismo también es conocido como efecto de permisividad mejorada; gracias a él, la eficacia de diversos medicamentos contra el cáncer se ha incrementado, ya que la concentración de la sustancia aumenta en el tumor, mientras que se ve reducida en los tejidos sanos, con lo cual crece la ventana terapéutica y se evitan efectos nocivos (Gabizon y cols., 1994).

Por otra parte, los bloques estructurales de los liposomas, llamados lípidos **anfifílicos**, permiten agregar ligandos como polímeros, proteínas y nutrientes como los folatos, que nuestro cuerpo necesita en pequeñas cantidades para funcionar y mantenerse sano (véase la Figura 4). Estos ligandos ayudan a los liposomas a enlazarse de manera específica, pues incrementan su capacidad de distinguir entre tejidos enfermos y sanos. En el caso de los folatos, éstos ayudan de cierta manera a “engañar” a las células y provocar que “se coman” (endociten) a los liposomas, lo que ayuda a estos últimos a liberar sus contenidos dentro de las células para incrementar la eficacia.

Uno de los primeros usos de los liposomas con ligandos fue la encapsulación de sustancias terapéu-

ticas (Gregoriadis, 1973). En un comienzo, la interacción de estas vesículas con el cuerpo humano era poco conocida. El primer obstáculo fue que los liposomas eran filtrados rápidamente por el hígado y el bazo. Tamaños mayores a 200 nm tienen tiempos de circulación reducidos; por otra parte, aun con tamaños entre 20 nm y alrededor de 200 nm, las partículas son limpiadas por el sistema mononuclear fagocítico, que “etiqueta” a los liposomas para su destrucción, ya que básicamente “se come” todas aquellas sustancias que pueden ser nocivas en nuestro cuerpo.

Hace tiempo se descubrió que al agregar un polímero llamado polietilenglicol (mediante pegilación) es posible crear liposomas sigilosos, los cuales evitan ser marcados para su destrucción y, por lo mismo, pueden circular por más tiempo en el organismo (Allen y Cullis, 2013). Este descubrimiento abrió las puertas a nuevos medicamentos encapsulados, como el Doxil®, el cual se usa para el tratamiento contra el cáncer. Hoy se llevan a cabo pruebas clínicas de varias formulaciones que usan liposomas como vehículo de liberación.

■ **Aplicaciones futuras de los liposomas**

■ Los liposomas que identifican y atacan a los tejidos enfermos se parecen cada vez más a la idea propuesta

Anfifílico ▶ Propiedad de una molécula de ser hidrofílica (tiene una gran afinidad por el agua) y lipofílica (afinidad por las grasas).

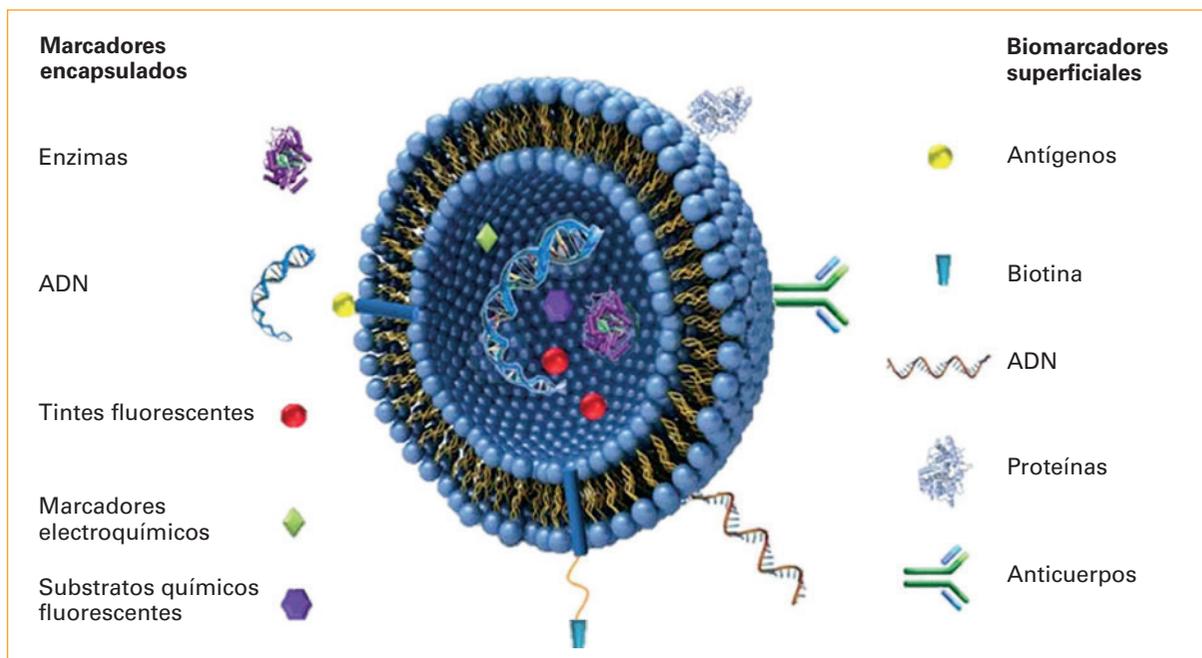


Figura 4. Diferentes sustancias que pueden ser encapsuladas en los liposomas, así como modificaciones posibles a la superficie. Fuente: Liu y Boyd (2013), con permiso de la Real Sociedad de Química.

por el médico alemán Paul Ehrlich: “la bala mágica”, capaz de ser disparada únicamente contra los agentes que provocan una enfermedad. Los liposomas pueden ser utilizados para una gran variedad de aplicaciones y nuevas formulaciones con el objetivo de manipular de manera íntima los mecanismos biológicos y reducir los daños al organismo.

La nanotecnología es uno de los campos de conocimiento científico más interesantes en la actualidad; en conjunto, la física, la química, la medicina y la biología molecular encuentran vastos usos de la ciencia básica y sus aplicaciones, que han alcanzado incluso a la mejor ciencia ficción. La piedra filosofal de la medicina está cada vez más cerca y quizá el futuro científico o científica que dé el último gran impulso necesario a esta interesante rama del conocimiento hoy está leyendo este artículo.

Rubén Rodrigo López Salazar

Research Institute of the McGill University Health Centre.
ruben.lopezsalar@mail.mcgill.ca

Luis Olivares Quiroz

Universidad Autónoma de la Ciudad de México.
luis.olivares@uacm.edu.mx

Lecturas recomendadas

- Allen, T. M. y P. R. Cullis (2013), “Liposomal drug delivery systems: from concept to clinical applications”, *Adv Drug Deliv Rev*, 65(1):36-48.
- Bangham, A. D., M. M. Standish y J. C. Watkins (1965), “Diffusion of univalent ions across the lamellae of swollen phospholipids”, *Journal of Molecular Biology*, 13(1):238-252.
- Gabizon, A., R. Catane, B. Uziely, B. Kaufman, T. Saffra, R. Cohen, F. Martin, A. Huang y Y. Barenholz (1994), “Prolonged circulation time and enhanced accumulation in malignant exudates of doxorubicin encapsulated in polyethylene-glycol coated liposomes”, *Cancer Research*, 54(4):987-992.
- Gregoriadis, G. (1973), “Drug entrapment in liposomes”, *FEBS Letters*, 36(3):292-296.
- Liu, Q. y B. J. Boyd (2013), “Liposomes in biosensors”, *Analyst*, 138(2):391-409.
- Matsumura, Y. y H. Maeda (1986), “A New Concept for Macromolecular Therapeutics in Cancer Chemotherapy: Mechanism of Tumor-tropic Accumulation of Proteins and the Antitumor Agent Smancs”, *Cancer Research*, 46(12):6387-6392.
- Patil, Y. P. y S. Jadhav (2014), “Novel methods for liposome preparation”, *Chemistry and Physics of Lipids*, 177:8-18.
- Pattni, B. S., V. V. Chupin y V. P. Torchilin (2015), “New Developments in Liposomal Drug Delivery”, *Chemical Reviews*, 115(19):10938-10966.

Gipumi Torres Abe, Elizabeth Cisneros Lozano y Víctor M. Ayala García



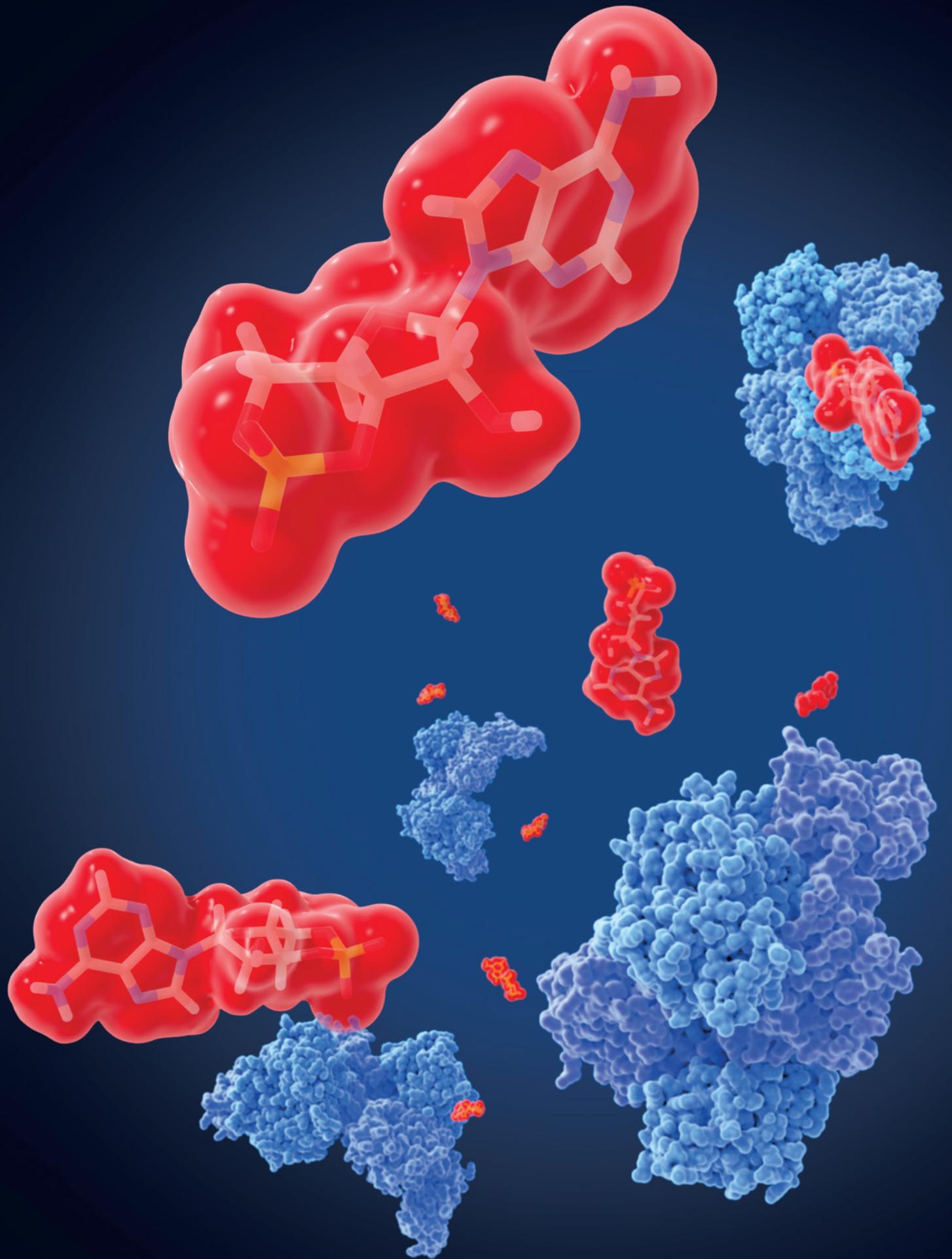
Captemos la señal: importancia de un nuevo segundo mensajero bacteriano

Recientemente se descubrió en algunas bacterias un segundo mensajero dinucleotídico esencial que participa en la regulación de varias vías metabólicas ante cambios ambientales detectados por las células. Esta molécula (c-di-AMP) es importante para la comunicación y homeostasis celular, reparación del ADN, resistencia a antibióticos, entre otras actividades con potencial de aplicación biotecnológica.

Introducción

Hoy más que nunca, la comunicación es vital en cualquier ámbito de nuestras vidas, pero no sólo entre nuestra especie, sino en cualquier organismo vivo, por muy “simple” que parezca. Las bacterias son microorganismos que a lo largo de la evolución han desarrollado mecanismos para sobrevivir ante los cambios del entorno que constituyen un peligro para ellas. Varias vías de señalización pueden verse como una forma de comunicación celular entre moléculas químicas llamadas segundos mensajeros, los cuales sirven como señales que, al unirse a moléculas específicas, generan una serie de cambios al interior de las células y les permiten activar una respuesta.

El adenosín monofosfato dicíclico, o c-di-AMP, es un segundo mensajero de naturaleza nucleotídica, constituido con el mismo material con el que funcionan los bloques para la construcción de moléculas de ADN, y el cual fue descrito recientemente como esencial en las bacterias que lo producen, pues si por alguna razón no está presente, las bacterias no sobreviven. Varias funciones dentro de las células bacterianas se han asociado para ser dependientes de esta pequeña molécula, tanto en bacterias patógenas como no patógenas, así como en organismos vecinos cercanos (incluso no bacterianos o multicelulares) pertenecientes al mismo hábitat, lo cual abre un gran abanico de posibilidades biotecnológicas para atacar problemas actuales de salud, ambiente y alimentación.



■ **Segundos mensajeros**

■ Para reconocer los cambios, o primeros mensajeros, en el entorno (como la temperatura, nutrientes, pH, salinidad, etc.) que pueden poner en peligro su supervivencia, todos los organismos dependen de mecanismos que les permiten captar las señales del exterior, transferirlas y desarrollar una respuesta adecuada. Esto se conoce como vías de transducción de señales. Para la transferencia de las señales, muchas células usan a los llamados segundos mensajeros, que son pequeñas moléculas que pueden difundirse fácilmente dentro de la célula o entre las células. En las bacterias, diversas moléculas nucleotídicas que no están presentes en el ADN o el ARN (las principales moléculas que sirven para almacenar y expresar la información genética) a menudo sirven como segundos mensajeros.

Los segundos mensajeros inician la señal de transducción al unirse a un receptor celular específico. Esta unión provoca que el receptor altere su conformación o función, y se produce como consecuencia un cambio dentro de la célula u organismo (véase la Figura 1). Su

Dominio
Unidad modular de una proteína capaz de realizar una función bioquímica definida.

sistema de señalización incluye mecanismos que generan o sintetizan, degradan y retransmiten las señales.

■ **El c-di-AMP**

■ El segundo mensajero adenosín monofosfato dicíclico, o c-di-AMP (véase la Figura 2), se descubrió inicialmente durante un estudio estructural en la bacteria *Thermotoga maritima* (un microorganismo que es capaz de resistir altas temperaturas) mientras se caracterizaba una proteína que “escanea” o supervisa la integridad del ADN, conocida como DisA. El c-di-AMP es sintetizado por enzimas llamadas ciclasas, las cuales propician la formación de una sola molécula de c-di-AMP a partir de dos moléculas de ATP o ADP. El resultado es un dinucleótido cíclico (es decir, de forma circularizada) que hasta el momento tiene cuatro clases conocidas de ciclasas, las cuales portan el **dominio** de di adenilato ciclasa (dominio llamado DAC), único conocido en la naturaleza capaz de sintetizar c-di-AMP.

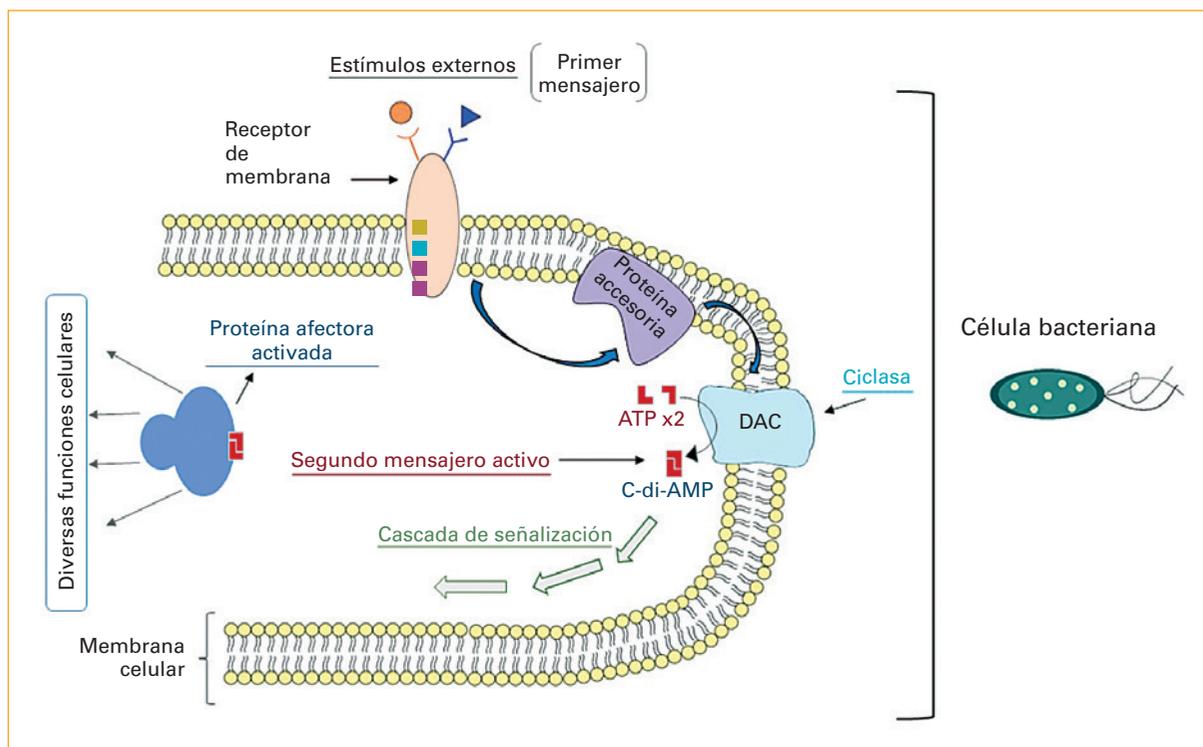


Figura 1. Esquematación de la comunicación celular bacteriana por el segundo mensajero dinucleotídico c-di-AMP. A partir de la captación de estímulos ambientales externos, una vía de señalización es iniciada hasta activar la síntesis de c-di-AMP por medio de una proteína ciclasa (DAC); esto despierta una cascada de señalización en la que c-di-AMP puede unirse a diversas proteínas efectoras y generar como respuesta la activación de variadas funciones en las células bacterianas.

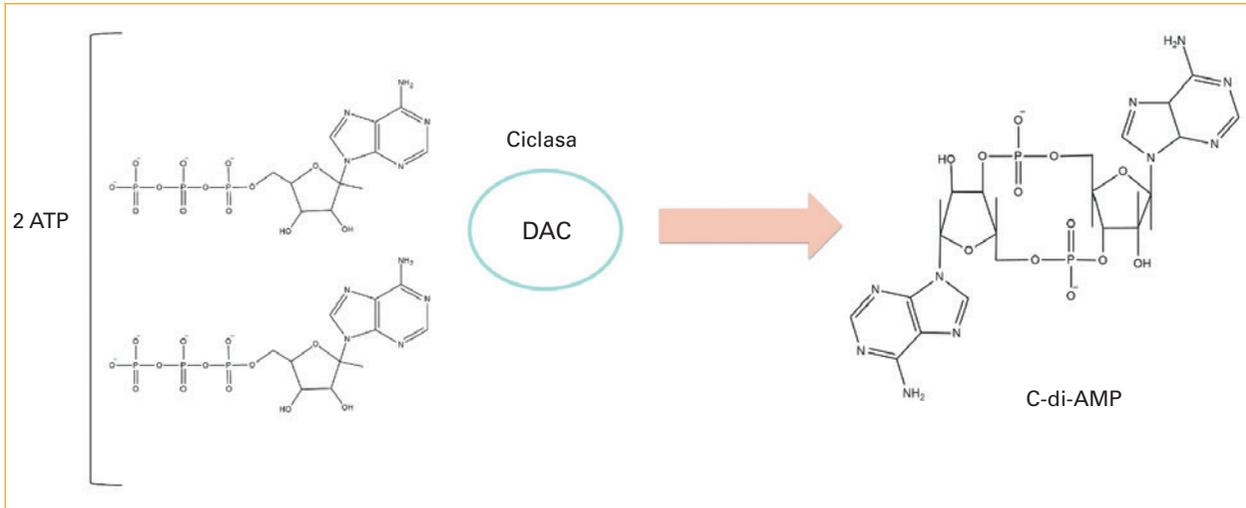


Figura 2. Síntesis y estructura del segundo mensajero: a partir de dos moléculas de ATP, una proteína ciclasa, a través de su dominio DAC, sintetiza una molécula de adenosín monofosfato dicíclico (c-di-AMP).

■ Importancia de la esencialidad del c-di-AMP

■ El c-di-AMP está distribuido ampliamente entre las bacterias y también en algunas arqueas, que son microorganismos unicelulares diferenciados de las bacterias. Éste es el único segundo mensajero que se ha descrito como esencial para muchas bacterias que lo producen; entre ellas, la bacteria de importancia biotecnológica *Bacillus subtilis* y los patógenos de humanos como *Staphylococcus aureus*, *Listeria monocytogenes*, *Streptococcus pneumoniae* y *Mycoplasma pneumoniae*. Cabe señalar que el término *esencial* se utiliza para genes o funciones que son absolutamente necesarias en condiciones naturales, y que estos genes o funciones pueden volverse prescindibles en diferentes condiciones de crecimiento.

El segundo mensajero c-di-AMP es de vital importancia para el crecimiento en varias especies bacterianas, ya que muchas funciones celulares básicas están reguladas por dicha molécula, incluido el mantenimiento de la pared celular, la **homeostasis** del ion potasio, la reparación del daño al ADN, entre otras. Tales procesos denotan que el c-di-AMP es fundamental para el correcto funcionamiento celular. De hecho, diversos estudios han revelado que las alteraciones en la concentración celular de c-di-AMP producidas al hacer cambios en los genes que codifican para su síntesis, de alguna u otra manera, afectan la integridad de la pared celular que protege

a las bacterias. Por ejemplo, una reducción severa de la concentración celular de c-di-AMP provoca el rompimiento de la membrana celular de *L. monocytogenes* y *B. subtilis*.

Además, las bacterias que producen cantidades reducidas de c-di-AMP se vuelven susceptibles a antibióticos cuya forma de acción va dirigida hacia la degradación de la pared celular, como la cefuroxima, la metilicina y oxacilina. Por el contrario, el aumento en el contenido de c-di-AMP dentro de la célula también plantea problemas para la bacteria, ya que se ha visto que altas concentraciones de esta molécula resultan tóxicas y generan desequilibrios metabólicos que llevan a la muerte celular; por esta razón, se dice que este segundo mensajero funciona como un “veneno esencial”, pues, al mismo tiempo que es necesario, un desequilibrio en sus cantidades óptimas para el funcionamiento celular puede resultar letal.

■ Participación del c-di-AMP en procesos celulares bacterianos

■ DisA, además de ser una de las cuatro enzimas que catalizan la síntesis de c-di-AMP, también es una proteína que regula de manera directa los mecanismos de reparación del ADN en respuesta al daño que éste presente. DisA es particularmente frecuente en

◀ Homeostasis

Conjunto de fenómenos que pueden autorregularse como una respuesta de adaptación a estímulos externos.

bacterias Gram positivas formadoras de esporas, las cuales son estructuras de resistencia que se producen en respuesta a condiciones ambientales y nutricionales adversas, como en el caso de los géneros *Bacillus* y *Clostridium*. Por ejemplo, durante la esporulación en *B. subtilis*, DisA “escanea” el ADN y, si encuentra lesiones, detiene la producción de c-di-AMP, lo que resulta en una entrada tardía en la esporulación; pero después de reparar el daño en el ADN, la síntesis de c-di-AMP se reinicia, lo cual sirve como una señal para que la vía de esporulación se reactive.

Otra proteína conocida como CdaA, o algunas veces referida como DacA, es una de las enzimas que sintetiza a c-di-AMP y se encuentra en una amplia variedad de bacterias, incluidos patógenos humanos como *S. aureus*, *S. pneumoniae*, *S. pyogenes* y *L. monocytogenes*. Se ha demostrado que el c-di-AMP producido por CdaA está involucrado en el mantenimiento de la homeostasis de la pared celular y en el control de la actividad del canal de iones de potasio, que son actividades primordiales para la salud celular bacteriana. En *B. subtilis*, CdaA interactúa físicamente con otra proteína llamada GlmM, que cataliza un primer paso en la producción de una molécula llamada UDP-N-acetil glucosamina (un bloque de construcción de la pared celular). Es probable que esta interacción vincule la homeostasis de la pared celular con la actividad de CdaA y, por lo tanto, los niveles de c-di-AMP en la célula.

Una más de las vías de señalización celular en las que participa el c-di-AMP es el transporte de potasio. Este ion es de fundamental importancia en todas las células vivas. En las bacterias, el potasio tiene funciones esenciales para la adaptación a los cambios en la **osmolaridad**, ya que controla la actividad de las enzimas intracelulares, regula el pH interno y mantiene un **potencial de membrana** apropiado. Se sabe que una proteína bacteriana transportadora de potasio, conocida como KtrA, ve inhibida su función al unírsele el c-di-AMP. Estudios en *S. aureus* mostraron que el aumento intracelular de c-di-AMP exhibe tasas de supervivencia más bajas en comparación con condiciones en las que las concentraciones de c-di-AMP no varían. El vínculo entre c-di-AMP y las proteínas del canal de iones de potasio se en-

cuentra no sólo en *Staphylococcus*, sino también en las especies de *Bacillus* y *Streptococcus*.

Por otro lado, DarR es una proteína que fue reportada como el primer receptor de c-di-AMP en la bacteria *Mycobacterium smegmatis*. Ésta tiene la capacidad de unirse a regiones específicas del ADN que están involucradas en el metabolismo de ácidos grasos y de otras moléculas orgánicas. Los ácidos grasos son componentes esenciales de las membranas y fuentes importantes de energía metabólica en todos los organismos; al mismo tiempo, hay enzimas encargadas de la producción o modificación de **acil-CoA** que son esenciales para la síntesis de lípidos, el catabolismo de los ácidos grasos y la remodelación de los fosfolípidos. El mecanismo detallado de la regulación por c-di-AMP de DarR no se conoce bien, ni se ha identificado el sitio de unión de c-di-AMP, pero se ha demostrado que c-di-AMP estimula la unión de DarR a su secuencia objetivo de ADN.

El c-di-AMP también está involucrado con otras moléculas de señalización, como el tetrafosfato de guanosina y pentafofosfato de guanosina (denominados colectivamente (p)ppGpp). Este compuesto desencadena una serie de vías de señalización conocida como **respuesta estricta**, utilizada por la gran mayoría de las especies bacterianas para lidiar con deficiencias nutricionales. La respuesta estricta y (p)ppGpp tienen funciones importantes en la regulación de la virulencia bacteriana, la supervivencia durante la invasión del huésped, la resistencia a los antibióticos, la formación de biopelículas y la esporulación.

La conexión entre estos dos sistemas de señalización de nucleótidos es bidireccional; (p)ppGpp inhibe la degradación de c-di-AMP, lo que conlleva un aumento en la concentración de c-di-AMP. De hecho, los estudios con *L. monocytogenes* han revelado que la eliminación de las enzimas ciclasas de c-di-AMP sólo es posible en bacterias que carecen de (p)ppGpp, lo que sugiere que ambos sistemas están vinculados para responder a las señales de estrés.

Proyecciones en el estudio y aplicación de c-di-AMP
 Con lo hasta aquí mencionado, es notorio que los segundos mensajeros son elementos críticos para las

Acil-CoA
 Unión de coenzima A y grupos acilo derivados de ácidos carboxílicos mediante un enlace tioéster fundamental en la síntesis de ácidos grasos.

Respuesta estricta
 Mecanismo de respuesta a estrés, propia de organismos bacterianos, activado ante la deficiencia de nutrientes.

Osmolaridad
 Concentración de partículas activas en el medio.

Potencial de membrana
 Diferencia de potencial de iones a ambos lados de una membrana biológica.



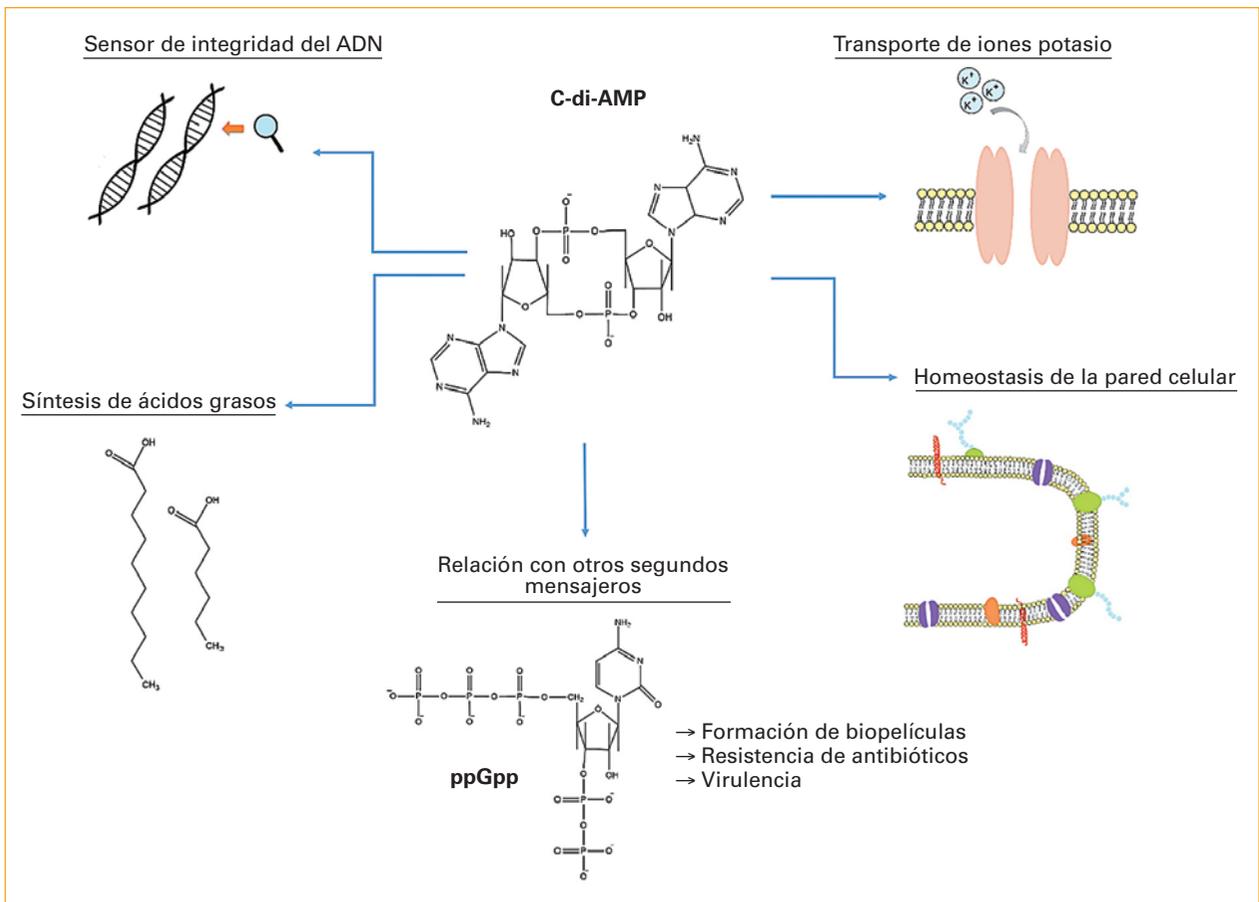


Figura 3. Funciones celulares bacterianas conocidas por ser reguladas por c-di-AMP. Este segundo mensajero se relaciona con diversas vías metabólicas en las células en las que se produce. Algunas de estas funciones son el aseguramiento de la integridad del material genético (ADN), la síntesis de ácidos grasos, el transporte de iones de potasio (K^+) a través de la membrana celular, la homeostasis de la pared celular bacteriana y la relación directa con otros segundos mensajeros nucleotídicos, como el (p)ppGpp, implicado en la formación de biopelículas, la resistencia a antibióticos y factores de virulencia regulados mediante la respuesta estricta.

vías de transducción de señales utilizadas por muchos organismos. Éstos están involucrados en la regulación de varios procesos celulares clave en las bacterias, muchas de ellas importantes desde el punto de vista de la biotecnología. En la última década, el c-di-AMP se ha identificado como un factor central en diversas bacterias Gram positivas, como es el caso de la regulación de la síntesis de la pared celular, los canales de iones de potasio, la reparación del ADN, entre otras funciones (véase la Figura 3). Éstas y otras actividades celulares pueden verse modificadas al alterarse la síntesis o degradación del c-di-AMP, por lo que actualmente se buscan estrategias que permitan cambiar las funciones de las enzimas implicadas en producir o degradar a este segundo mensajero, con lo que se provoca su disminución o aumento dentro

de las células. Los cambios mencionados permiten aprovechar la desregulación metabólica generada y propiciar condiciones deseables en muchas bacterias patógenas; por ejemplo, al hacerlas susceptibles a la **lisis** celular para su erradicación, lo cual implica nuevas opciones de antibióticos.

Por otro lado, se investiga si hay segundos mensajeros como el c-di-AMP que son reconocidos más allá de las células bacterianas. A este respecto, se ha reportado que las células de las raíces de algunas plantas son capaces de detectar la presencia de bacterias benéficas y generar relaciones simbióticas mediante el reconocimiento de c-di-AMP; por lo tanto, esto representa un enorme potencial biotecnológico en la industria agroalimentaria, ya que permitiría la producción de más y mejores plantas mediante la in-

Lisis → Ruptura de la membrana y pared celular bacteriana que implica la salida del material biológico y, por ende, la muerte de las células.

teracción directa con sus hospederos naturales, pero regulando o propiciando condiciones para un mejor aprovechamiento de los recursos de señalización compartidos. Éstas y otras utilidades son aún materia de investigación cuya aplicación busca rendir frutos en el corto plazo.

Gipumi Torres Abe

Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

kipumi15@gmail.com

Elizabeth Cisneros Lozano

Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

elifonsi53@gmail.com

Víctor Manuel Ayala García

Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Juárez del Estado de Durango.

victor.ayala@ujed.mx

Lecturas recomendadas

Commichau, F. M., A. Dickmanns, J. Gundlach, R. Ficner y J. Stulke (2015), "A jack of all trades: the multiple roles of the unique essential second messenger cyclic di-AMP", *Molecular Microbiology*, 97 (2): 189-204.

Corrigan, R. M. y A. Grundling (2013), "Cyclic di-AMP: another second messenger enters the fray", *Nature Reviews Microbiology*, 11 (8): 513-524.

Fahmi, T., G. C. Port y K. H. Cho (2017), "c-di-AMP: An Essential Molecule in the Signaling Pathways that Regulate the Viability and Virulence of Gram-Positive Bacteria", *Genes (Basel)*, 8 (8): 197.

Pham, T. H., Z. X. Liang, E. Marcellin y M. S. Turner (2016), "Replenishing the cyclic-di-AMP pool: regulation of diadenylate cyclase activity in bacteria", *Current genetics*, 62 (4): 731-738.

Valenzuela-García, L. I., V. M. Ayala-García, A. G. Regalado-García, P. Setlow y M. Pedraza-Reyes (2018), "Transcriptional coupling (Mfd) and DNA damage scanning (DisA) coordinate excision repair events for efficient *Bacillus subtilis* spore outgrowth", *Microbiology Open*, 7 (5): e00593.

María Clara Avendaño Monsalve y Soledad Funes

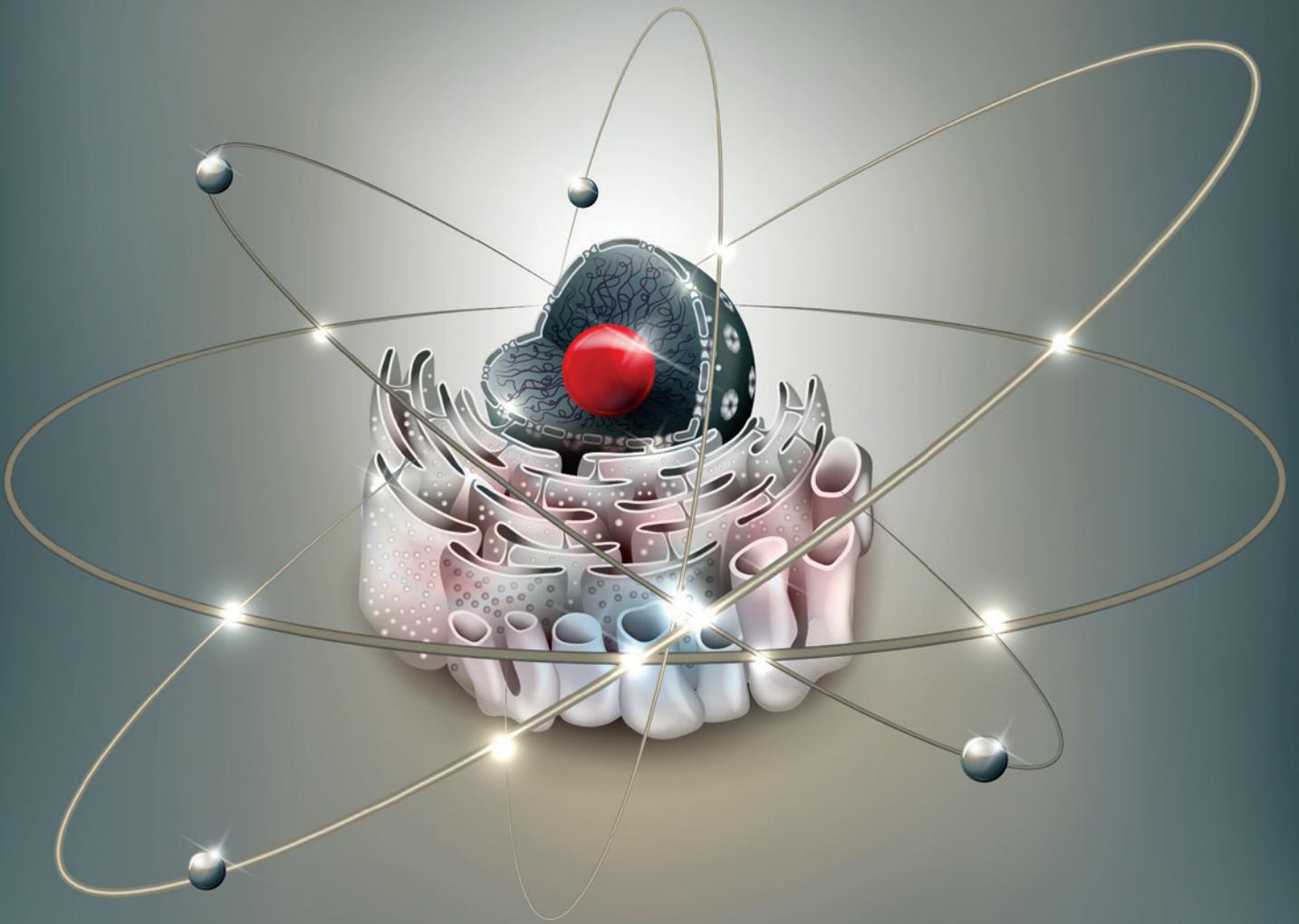
Los sistemas de transporte de proteínas en la célula: ¿metro o taxi?

Cada una de las proteínas celulares funciona en sitios específicos, por lo que los sistemas que las transportan al lugar donde llevan a cabo su tarea son complejos y requieren diversos factores para que el proceso sea exitoso. En este artículo hacemos una analogía entre una célula y una ciudad para explicar los diferentes medios de transporte que utilizan las proteínas dentro de la célula.

La célula es la unidad fundamental de la vida que conforma a todos los organismos. En la naturaleza podemos encontrar millones de células muy diferentes entre sí que se pueden clasificar en procariontes, como una bacteria, o eucariontes, como las levaduras o las células que componen nuestro cuerpo (léase el Recuadro 1). Ambos tipos celulares comparten muchas funciones; por ejemplo, todas son capaces de producir sus propias proteínas, las cuales son moléculas biológicas que participan en diferentes tareas, como respirar, moverse o procesar los alimentos para obtener nutrientes.

Se ha calculado que en una levadura existen 42 millones de proteínas (Ho y cols., 2018), por lo que uno de los desafíos más grandes que tiene la célula es identificar a cada una de ellas y transportarlas hasta el lugar específico dentro de los diferentes compartimentos u organelos donde deben llevar a cabo su función (léase el Recuadro 2). La gran pregunta es: ¿cómo sabe la proteína que debe dirigirse a un lugar específico en la célula?; o, dicho de otra manera, ¿cómo están organizados los sistemas de transporte de proteínas dentro de la célula?

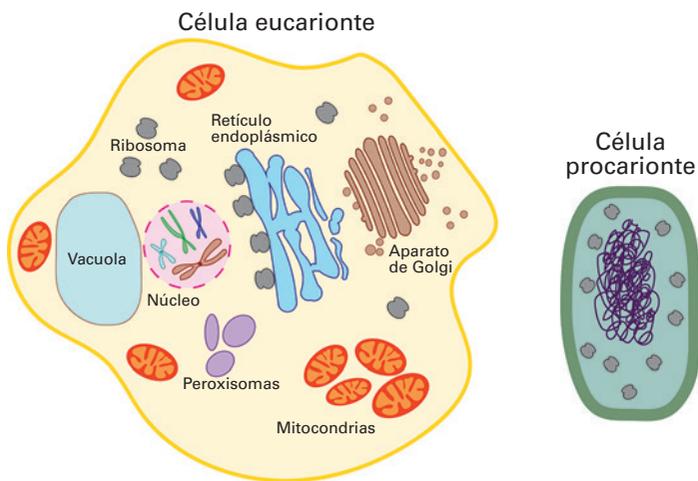
Para responder estas preguntas, vamos a imaginar que las células eucariontes son como una gran ciudad dividida en vecindarios que corresponden a los organelos; esto es, lugares específicos donde se llevan a cabo los diferentes trabajos de la célula. Podríamos pensar en varios vecindarios: uno es donde se encuentran las fábricas que producen los insumos necesarios para que la célula se desarrolle; otro es el vecindario de los basureros, en el que partes de la célula que ya no funcionan



Recuadro 1.

Las células eucariontes y procariontes

Las células eucariontes tienen una organización interna compleja, ya que poseen organelos, los cuales son compartimentos delimitados por una membrana lipídica. Entre los organelos tenemos el núcleo, las mitocondrias, el retículo endoplásmico, el aparato de Golgi, los peroxisomas y, en el caso de las células vegetales, los cloroplastos; el espacio en donde se encuentran estos organelos se llama citoplasma. Por el contrario, las células procariontes son aquellas con una organización interna sencilla sin organelos, pero sí tienen zonas específicas que llevan a cabo ciertas funciones.



adecuadamente se degradan y reciclan; también está el vecindario donde se encuentran la terminal de autobuses y el aeropuerto, para que los productos de la célula sean enviados a otras células. Como en toda ciudad grande, en la célula también se requieren sistemas de transporte organizados y bien señalizados, para que cada proteína tome la vía adecuada que le permita llegar hasta donde tiene que hacer su trabajo.

En muchas ciudades del mundo, una forma muy rápida de llegar de un extremo a otro es usando el metro, para lo cual es muy importante escoger la línea correcta que se debe tomar. Sin embargo, en situaciones especiales, a veces resulta más práctico

usar un taxi para llegar rápidamente a nuestro destino sin paradas intermedias. Lo mismo pasa en la célula, razón por la cual describiremos algunos de los sistemas de transporte más usados por las proteínas en las células eucariontes para explicar cómo son enaminadas a las diferentes rutas.

El viaje de una proteína comienza cuando el ribosoma termina su síntesis y ésta queda libre en el citoplasma; de ahí debe trasladarse al sitio en donde llevará a cabo su función. Este tipo de transporte se llama postraduccional, porque ocurre después de la traducción del material genético que da lugar a la proteína correspondiente. Si lo pensamos en el contexto de la ciudad, la proteína recién fabricada y liberada por el ribosoma toma una de las líneas del sistema del metro para llegar hasta su destino (véase la Figura 1a). Por otro lado, es importante mencionar que algunas proteínas requieren ser llevadas hasta su lugar de trabajo de forma inmediata y sin paradas intermedias; en este caso, el ribosoma se dirige hasta el destino final de la proteína y, allí mismo, ocurre la síntesis y la entrega instantánea de la proteína. Este mecanismo se llama cotraduccional, ya que, de forma análoga a lo sucede en la ciudad, las proteínas que siguen este modelo usan un taxi para llegar más rápido a su lugar de trabajo (véase la Figura 1a).

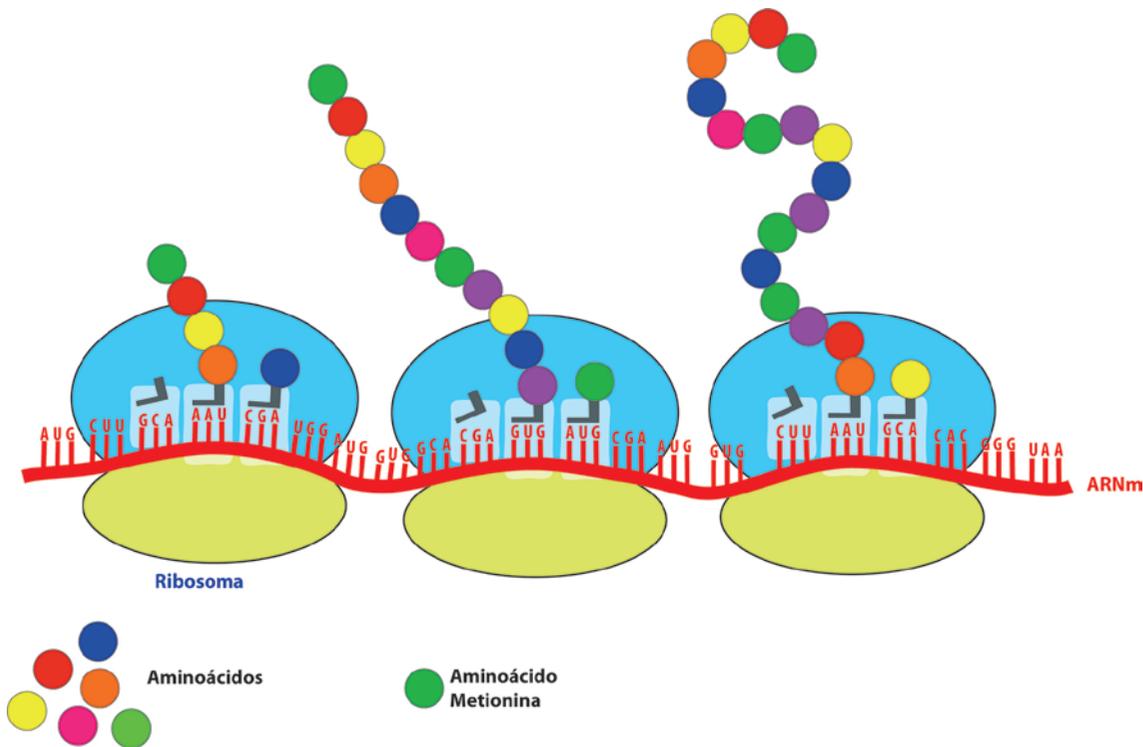
Los gafetes del transporte celular

Cada proteína tiene una secuencia señal que la guía dentro del sistema de transporte celular; estas marcas sirven como un gafete de identificación que le ayuda a ser reconocida por los diferentes sistemas de transporte. De esta forma, se evita que lleguen a lugares incorrectos o que se pierdan en las diversas rutas que existen (véase la Figura 1b). Estas señales funcionan de manera similar al gafete que se debe presentar para entrar al lugar de trabajo; por ejemplo, el personal bancario debe portar siempre un gafete para identificarse como trabajadores de ese banco, o bien los estudiantes de una universidad tienen una credencial que los identifica como parte de la comunidad universitaria. En el caso de las células, estos gafetes o señales sirven para que las proteínas elijan la ruta de transporte y, además, para que pue-

Recuadro 2. ¿Cómo se sintetizan las proteínas?

Las proteínas están formadas por unos compuestos llamados aminoácidos. El encargado de unir aminoácido por aminoácido es el ribosoma, una maquinaria compleja que, con la ayuda de un intérprete, llamado ARN de transferencia, es capaz de leer un código de tres letras que le indica cuál es el siguiente aminoácido en la cadena. Este código genético está formado por la combinación de cuatro bases nitrogenadas, representadas por las letras A (adenina), G (guanina), C (citosina) y U (ura-

cilo). Diferentes combinaciones de estas cuatro bases forman el ARN mensajero, que es la molécula responsable de entregar el mensaje codificado que será traducido por el ribosoma; por esta razón, el proceso de síntesis de las proteínas también se llama traducción. Algo curioso es que las letras AUG marcan el inicio de la traducción: una vez que el ribosoma lee este triplete se mueve tres posiciones, y así lee el siguiente aminoácido, hasta completar la proteína.



dan entrar al organelo en donde deben desempeñar su función.

Dichas señales son variadas pero exclusivas para cada organelo en donde la proteína lleva a cabo su función. Los nombres y las características de las etiquetas serán descritas en cada uno de los casos que explicaremos más adelante. Una vez que la proteína llega a su destino, se encuentra con compuertas que

están distribuidas a lo largo de la **membrana lipídica** de los organelos; en estas compuertas se revisa la señal y, en caso de que sea correcta, se permite el ingreso de la proteína al organelo. En algunas ocasiones, esta señal puede ser modificada después que la proteína entró, y en ese caso es removida para que adquiera su tamaño definitivo y pueda cumplir su función.

Membrana lipídica
Láminas de lípidos o ácidos grasos organizadas en forma de capas contrapuestas que rodean a los organelos de la célula.

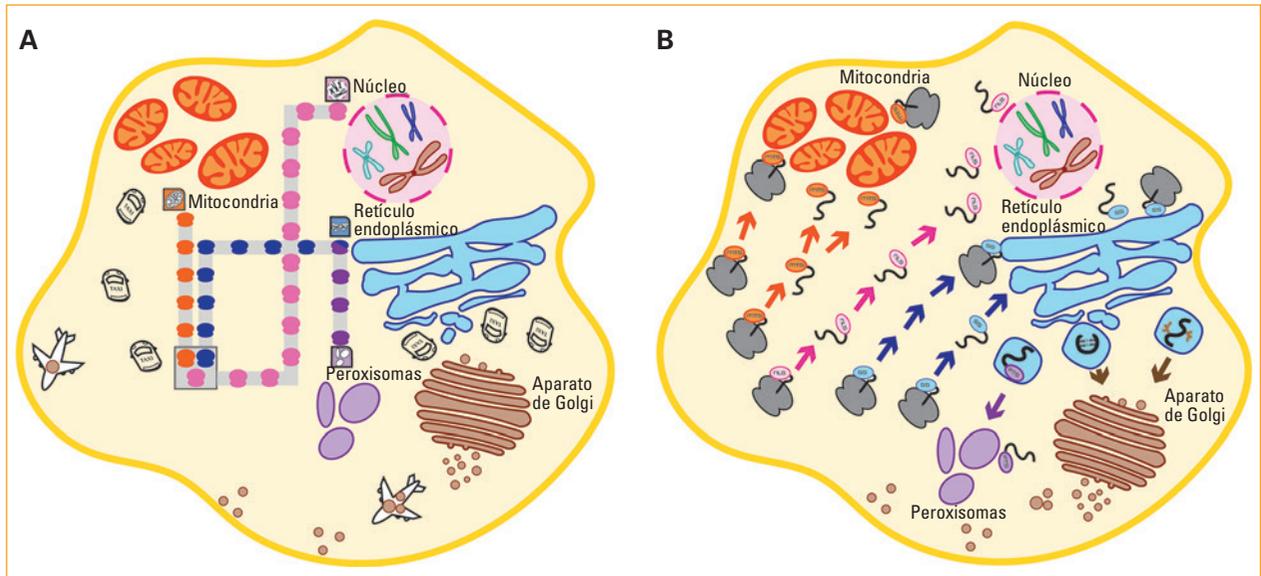


Figura 1. Las rutas de transporte de proteínas dentro de una célula se pueden comparar con los medios de transporte de una ciudad. *a)* Las proteínas de la mitocondria y del retículo endoplásmico usan el metro, la línea naranja o azul, respectivamente, o bien llegan en taxi. Por lo general, las proteínas del peroxisoma deben transbordar en el retículo endoplásmico para tomar la línea morada del metro. Por otro lado, el aparato de Golgi hace las veces de aeropuerto celular para que las proteínas lleguen hasta los lugares más alejados de la célula o incluso hasta otras células. *b)* Las proteínas contienen secuencias señal que son interpretadas y que determinan su localización celular. Las MTS (óvalos naranjas) identifican una proteína que debe ser llevada hasta las mitocondrias, las SS (óvalos azules) funcionan para el transporte al retículo endoplásmico, las PTS (óvalos morados) indican un destino peroxisomal, y las NLS (óvalos rosas) dirigen a las proteínas nucleares. Estas secuencias señal pueden ser leídas mientras las proteínas se encuentran en proceso de síntesis por los ribosomas (grises) o una vez que han sido liberadas en el citoplasma. Algunas de las proteínas que llegan al retículo endoplásmico son posteriormente transportadas en vesículas hasta los peroxisomas (si contienen una señal PTS), o hacia el aparato de Golgi después de haber sufrido modificaciones como la formación de enlaces disulfuro (indicados como S-S) o la adición de azúcares (ramificaciones cafés).

■ La mitocondria, el vecindario obrero de la célula

En las mitocondrias culmina la transformación de los alimentos y nutrientes para la producción de energía. Por esta razón puede considerarse como el barrio obrero de la ciudad. La energía de las células proviene del adenosín trifosfato (ATP), una molécula que es sintetizada por la maquinaria biológica al interior de las mitocondrias. Este proceso es similar a la generación de la energía en una central hidroeléctrica, en la cual el agua hace girar una turbina con tal potencia que es capaz de producir energía. Ésta es sin duda alguna la principal función de las mitocondrias; sin embargo, no es la única: estos organelos también se encargan de la degradación de algunos lípidos o grasas, aminoácidos y otros compuestos nitrogenados.

Así pues, todas las proteínas cuya función se encuentra relacionada con la mitocondria deben dirigirse a ella, y para esto deben portar su gafete o señal, denominada secuencia de localización mitocondrial

(MTS), una hélice de aminoácidos presente en el extremo de la proteína (véase la Figura 1b, óvalos anaranjados). Portar esta identificación les permite subirse únicamente a la línea naranja del metro, que se dirige hacia la mitocondria.

No obstante, algunas de estas proteínas usan el transporte cotraduccional, o el taxi, ya que debido a sus características intrínsecas deben ser entregadas inmediatamente a los puntos de acceso de la membrana de la mitocondria. Estos puntos se llaman translocasa de la membrana externa mitocondrial (TOM) y funcionan de forma parecida a las puertas con lectores inteligentes que reconocen la señal o el gafete de las proteínas para dejarlas pasar. Por ejemplo, la proteína fumarasa, que participa en la degradación de nutrientes, debe ser sintetizada y transportada a la mitocondria; esta proteína es de las afortunadas que toma un taxi, llega directamente a los TOM y muestra su MTS para poder entrar al organelo.

■ El retículo endoplásmico, el centro de distribución de la ciudad

■ Podría decirse que el retículo endoplásmico es la central de distribución de la ciudad, donde se reúnen hasta un tercio de las proteínas de una célula; a él llegan proteínas que deben ser distribuidas a otros lugares. Una de las funciones del retículo endoplásmico es ser el punto de control de calidad y distribución, ya que antes de que las proteínas lleguen a su lugar de trabajo, deben ser modificadas mediante la adición de algunos azúcares o la formación de **enlaces disulfuro** que les permitan adquirir una estructura tridimensional particular. Estas modificaciones son esenciales para la función de cada proteína; es decir, si no se llevan a cabo, la proteína no puede trabajar de manera correcta. Adicionalmente, el retículo endoplásmico se encarga de la síntesis de lípidos, las moléculas de las cuales están hechas las membranas de las células.

Las proteínas de este organelo cuentan con una secuencia señal de localización del retículo endoplásmico (SS) (véase la Figura 1b, óvalos azules), la cual está formada por alrededor de 10 a 15 aminoácidos **hidrofóbicos**. De manera similar a lo que pasa en la mitocondria, las proteínas del retículo endoplásmico pueden seguir el sistema postraduccional, al usar la línea azul del metro, o el sistema cotraduccional, al elegir un taxi, que es en realidad el preferido de estas moléculas.

En el retículo endoplásmico existen dos tipos de puertas de acceso: si las proteínas llegan en metro, deben entrar por la puerta GET (maquinaria involucrada en el transporte entre el aparato de Golgi y el retículo endoplásmico); si usaron taxi, deben ingresar por la puerta SEC (maquinaria involucrada en la vía de secreción). Ambas puertas tienen sensores que leen el gafete o la señal SS. Una vez que las proteínas entran al retículo endoplásmico y son modificadas, son empacadas en una “bolsita” membranosa o vesícula, en donde serán transportadas hasta su destino; algunas llegarán al peroxisoma y otras al aparato de Golgi, como se explica a continuación.

■ El peroxisoma, un barrio sin sitio de taxis

■ El peroxisoma es el encargado del procesamiento o degradación de lípidos, así como también del meta-

bolismo oxidativo de la célula. Este organelo ayuda a la eliminación de radicales libres que se producen en las reacciones celulares y que pueden generar un daño al organismo.

Las proteínas del peroxisoma son un caso particular en el sistema de transporte celular, ya que no existe evidencia de que utilicen taxi (el sistema cotraduccional), pero pueden transportarse por dos rutas distintas: la primera es llegar al retículo endoplásmico en la línea azul del metro y posteriormente dirigirse hacia el peroxisoma dentro de vesículas; la segunda, más directa, no requiere de la participación de ningún otro organelo.

Las proteínas del peroxisoma también tienen una señal, llamada secuencia de localización peroxisomal (PTS), con 11 aminoácidos como mínimo y, de preferencia, con carga positiva (véase la Figura 1b, óvalos morados). Sin embargo, en el peroxisoma no hay puertas de acceso preexistentes; en cambio, hay sensores libres en el citoplasma que leen las señales PTS y ensamblan puertas transitorias en la membrana para que las proteínas puedan entrar.

■ El aparato de Golgi, el aeropuerto de la célula

■ Como pasa en muchas ciudades, la célula también tiene un aeropuerto para poder transportar a las proteínas que desempeñarán su función a las afueras, o incluso aquellas que deben llegar a otras células. Dicho aeropuerto se llama aparato de Golgi y su función es transportar por medio de vesículas a las proteínas que cumplen su función en la frontera de la célula o membrana plasmática. Como ejemplo de estas proteínas tenemos a todos los transportadores de azúcares, que permiten que este tipo de moléculas entren o salgan de la célula. Adicionalmente, el aparato de Golgi puede hacer modificaciones en las proteínas antes de ser empacadas y transportadas.

Hasta el momento no se han identificado señales especiales que guíen a las proteínas que salen de este organelo hacia su destino final. Es importante mencionar que antes de llegar al aparato de Golgi, éstas deben pasar por el retículo endoplásmico y, posteriormente, son llevadas hasta el aeropuerto por medio de vesículas.

◀ Enlace disulfuro

Unión covalente entre dos átomos de azufre.

◀ Hidrofóbico

Compuesto o sustancia que no puede disolverse en agua.

Un ejemplo muy claro de lo anterior es el transporte de insulina en nuestro cuerpo. La insulina es una hormona sintetizada en las células del páncreas y es necesaria para el **metabolismo** de azúcares como la glucosa en casi todos los tejidos celulares. En las células del páncreas, la insulina es llevada hasta el retículo endoplásmico, en donde sufre modificaciones para posteriormente ser dirigida al aparato de Golgi, donde se empaqueta en pequeñas cantidades para enviarla al torrente sanguíneo y así ser distribuida a todos los tejidos del organismo.

Metabolismo
Serie de reacciones químicas que degradan o sintetizan moléculas dentro de una célula para obtener ATP.

■ ■ ■ **El núcleo, centro de compilación de la información**

■ El núcleo de la célula es una zona muy peculiar en donde se encuentra aislado y protegido el material genético; es decir, el ADN, que contiene toda la información que se necesita para la vida. El ADN se encuentra organizado en cromosomas, los cuales a su vez contienen genes que son la unidad básica de la información. El número de cromosomas es variable en los organismos; sin embargo, deben ser duplicados cada vez que hay un proceso de división celular. Por su parte, cada gen debe ser transcrito para formar un

ARN mensajero, que a su vez es traducido por el ribosoma para producir la proteína correspondiente. Por lo tanto, se necesitan proteínas en el núcleo que se encarguen de estas funciones; es decir, que ayuden al mantenimiento, duplicación y procesamiento de la información contenida en el ADN.

Las proteínas llegan al núcleo siguiendo una ruta postraduccional, la línea rosada del metro. Adicionalmente, portan un gafete o señal que se denomina secuencia de localización nuclear (NLS), compuesta por una secuencia de 7 a 10 aminoácidos con carga positiva (véase la Figura 1b, óvalos rosas). Esta señal, contrario a lo que sucede en todos los casos descritos anteriormente, puede ocultarse para evitar que las proteínas ingresen al núcleo en el momento incorrecto.

■ ■ ■ **Conclusión**

■ En resumen, los sistemas de transporte de proteínas en la célula son muy complejos y apenas conocemos, con cierto detalle, los pasos que se necesitan para que una proteína llegue sin errores hasta el organelo en donde llevará a cabo su función. Una ma-



nera de asegurar la correcta entrega de las proteínas es mediante el uso de las señales únicas para cada organelo. Sin embargo, así como pasa en la vida diaria, en ocasiones las proteínas se pierden o los sistemas de transporte fallan; esto provoca que las proteínas lleguen a los organelos incorrectos o que nunca lleguen a su destino. Estas fallas activan sistemas de alarma que favorecen la síntesis de un tipo específico de proteínas, llamadas **chaperonas**, que ayudan a rescatar a las proteínas perdidas. Así pues, algunos de los procesos que llevan a cabo las células son muy similares a lo que vivimos en nuestra vida diaria; tal vez, la próxima vez que tomes el metro o un taxi, puedes pensar que algunas proteínas de tu cuerpo están usando el mismo medio de transporte que tú.

Maria Clara Avendaño Monsalve

Instituto de Fisiología Celular.
mavendano@ifc.unam.mx

Soledad Funes

Instituto de Fisiología Celular.
sfunes@ifc.unam.mx

Referencias específicas

- Barlowe, C. y E. Miller (2013), "Secretory Protein Biogenesis and Traffic in the Early Secretory Pathway", *Genetics*, 193383-410.
- Chacinska, A., C. Koehler, D. Milenkovic, T. Lithgow y N. Pfanner (2009), "Importing Mitochondrial Proteins: Machineries and Mechanisms", *Cell*, 138(4): 628-644.
- Farré, J. C., S. Mahalingam, M. Proietto y S. Subramani (2018), "Peroxisome biogenesis, membrane contact sites, and quality control", *EMBO Reports*, 20: e46864.
- Ho, B., A. Baryshnikova y G. Brown (2018), "Unification of Protein Abundance Datasets Yields a Quantitative *Saccharomyces cerevisiae* Proteome", *Cell Systems*, 6:192-205.
- Miyamoto Y., Y. Yoneda y M. Oka (2018), "17-Protein Transport Between the Nucleus and Cytoplasm", en C. Lavelle y J. M. Victor (eds.), *Nuclear Architecture and Dynamics*, Cambridge, Academic Press, pp. 387-403.

Chaperona

Proteína que asiste la obtención o mantenimiento de la estructura tridimensional de otras proteínas.

Ana Rosa Aguilera Juárez, Carlos Eliud Angulo Valadez y Luis Hernández Adame



Nanovacunas que valen oro

Las vacunas han salvado miles de millones de vidas al emplearse como tratamiento preventivo contra enfermedades infecciosas. La nanovacunología es un enfoque novedoso para el uso de nanopartículas como vehículos de entrega de vacunas. En este artículo se describe y propone, a partir de un método sencillo de síntesis, un prototipo de nanovacu-
na basada en nanopartículas de oro contra infecciones gastrointestinales.

La vacunación es el método más económico y efectivo para disminuir la mortalidad provocada por enfermedades infecciosas en todo el mundo. Actualmente se cuenta con 26 vacunas destinadas a la prevención de afecciones como la varicela, rabia, tétanos, influenza y virus del papiloma humano (VPH), además de que recientemente se desarrollaron diversas plataformas de vacunas contra COVID-19. Sin embargo, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que en 2018 cerca de 19.4 millones de personas no recibieron ningún tipo de vacunación. Por tal motivo, es necesario buscar alternativas innovadoras que permitan que las vacunas lleguen al mayor número de personas; para ello, debe procurarse que no pierdan su seguridad y eficacia y que sean económicamente viables para asegurar que los sectores más vulnerables de la población tengan acceso a ellas. A continuación se describe una opción de síntesis de prototipos de vacunas mediante nanotecnología como una herramienta para la fabricación de nanovacunas basadas en un material poco convencional para la medicina moderna hasta hace unos años: el oro.



Nacimiento de la vacunación

La “variolización” es la primera forma conocida de vacunación que se remonta a la antigua China en el siglo XI. No obstante, fue hasta 1721 en Gran Bretaña cuando Lady Mary Wortley Montagu formalizó la técnica, que consistía en inocular el pus obtenido de las pústulas de personas enfermas de “variola” a personas sanas. De esta manera se logró hacer inmunes a las personas contra el virus de la



hoy conocida viruela. Posteriormente, en 1796, Edward Jenner creó la primera vacuna contra esta enfermedad; administró a un niño la linfa (costra) de viruela vacuna, es decir, viruela de las vacas (de ahí el nombre con que conocemos hoy día a este método de prevención).

En 1885 Louis Pasteur desarrolló la vacuna contra la rabia que mostró su efectividad en el niño Joseph Meister a partir de la administración diaria, durante dos semanas, de fluidos y tejidos emulsificados obtenidos de cerebros de conejos que habían muerto por esta enfermedad. Además de salvarlo de la inminente muerte, Pasteur demostró que se podían obtener defensas específicas contra una infección si se administran formas debilitadas o atenuadas del microorganismo patógeno.

Así, la vacunación se ha revolucionado con el paso del tiempo (véase la Figura 1). La variolización fue remplazada por la administración de microorganismos atenuados, que hoy día se ha sustituido por el uso de formulaciones con subunidades (componentes: proteínas) de agentes infecciosos, e incluso con su material genético. Las vacunas de segunda y tercera generación (véase la Figura 2) se distin-

guen porque, además de que han permitido mantener el equilibrio entre eficacia y seguridad, utilizan ciencias innovadoras como la nanotecnología para mejorar su formulación, como es el caso de las nanovacunas.

■ ■ ■ **Nanopartículas y su clasificación**

La nanotecnología es la ciencia encargada del estudio de la materia a escala nanométrica. Los nanómetros (nm) son las unidades de medida de las nanopartículas. Para darnos una idea de este tamaño, hay que considerar que en un metro (m) hay un millardo (mil millones) de nanómetros. Una partícula es considerada nanopartícula cuando mide menos de 100 nm. El tamaño de las nanopartículas es un parámetro fundamental para considerar en su empleo biológico; por lo general se usan nanopartículas de 10 a 100 nm de diámetro, aunque son muchos los criterios por considerar al momento de elegir el tamaño y la forma de la nanopartícula, según el uso al cual estarán destinadas.

Las nanopartículas se clasifican por su composición química en dos grupos principales: orgánicas e



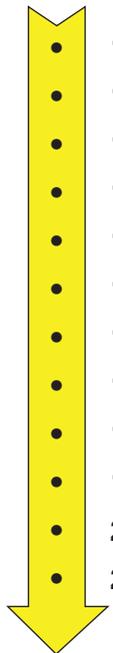
- 
- **1721** Introducción de la “variolización” de Asia a Europa.
 - **1796** Primera vacuna exitosa: **viruela**.
 - **1885** Primera vacuna vía-atenuada contra la **rabia**.
 - **1886** Vacunas de organismos muertos: cólera, tifoidea.
 - **1900** Vacunas de toxoides: difteria y tétanos.
 - **1948** Primera vacuna combinada: difteria, tétanos y tos ferina.
 - **1950** *In vitro* cultivo celular: salk y Sabin, vacunas contra la polio.
 - **1970** Primera vacuna de polisacáridos. Meningococcus, Neumococcus.
 - **1980** Vacunas de glicoconjugados: vacuna de la Hepatitis B (HBV).
 - **1981** Primera vacuna recombinante: vacunas de antígenos HBV.
 - **2010** Vacunas terapéuticas para cáncer de próstata.
 - **2013** Vacunología reversa: Meningococcus B.

Figura 1. Fechas sobresalientes de la historia de la vacunación. Fuente: Delany y cols. (2014).

inorgánicas. Entre las primeras podemos encontrar a todas aquellas compuestas por carbono (C); por ejemplo, los liposomas (grasas), las micelas (como las que se forman con las sales biliares en nuestro hígado y se almacenan en la vesícula biliar) o el quitosano (compuesto presente en exoesqueletos de crustáceos y microorganismos). Por otra parte, en la clasificación de las nanopartículas inorgánicas encontramos a las nanopartículas conductoras y semiconductoras.

Las nanopartículas de metales como el oro (Au) y la plata (Ag) son ejemplo de nanopartículas conductoras; las nanopartículas de óxidos de elementos como el cinc (Zn) son un ejemplo de nanopartículas semiconductoras. La naturaleza química de las nanopartículas es un criterio esencial para su selección, ya que este parámetro permite predecir el comportamiento que tendrán al ser administradas o puestas en contacto con los sistemas biológicos.

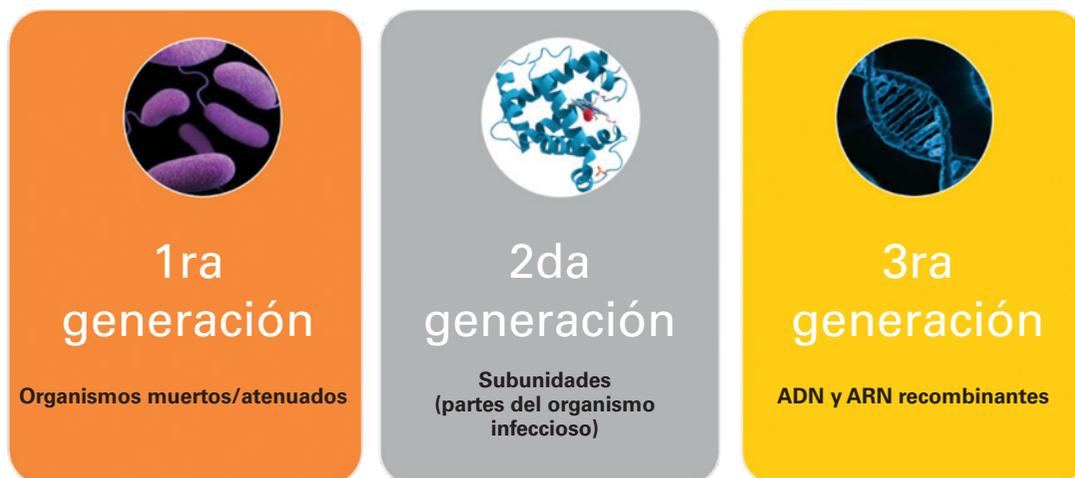


Figura 2. Tres generaciones de vacunas. Fuente: Delany y cols. (2014).

■ **Empleo de nanopartículas en la medicina**

■ Hoy las nanopartículas tienen un uso muy extendido en beneficio de la salud por sus diversas propiedades fisicoquímicas determinadas por su naturaleza química. En la última década se ha investigado y demostrado que las nanopartículas metálicas poseen propiedades fototerapéuticas aprovechables para el tratamiento del cáncer; a la fecha continúan en investigación para su posible uso en humanos. También se ha comprobado que las nanopartículas metálicas, específicamente de plata, tienen efectos antimicrobianos, y tanto las nanopartículas orgánicas como las inorgánicas se han empleado para los mecanismos de liberación y transporte de fármacos (Jeevanandam y cols., 2018; Kim y cols., 2014; Salazar y cols., 2015).

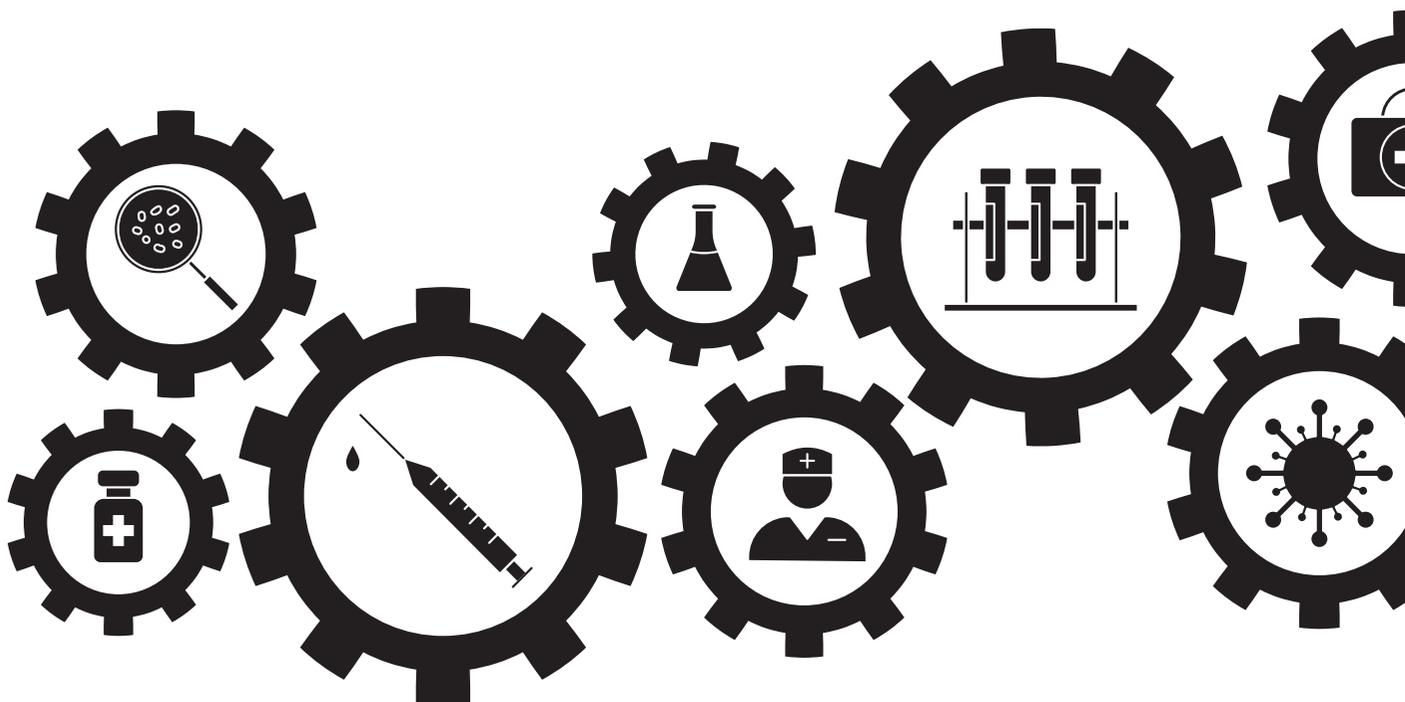
En el campo de la vacunología se han empleado nanopartículas orgánicas e inorgánicas para la formulación de prototipos de nanovacunas. La nanovacunología se refiere al uso de nanopartículas como vehículos de entrega de vacunas. Algunos estudios de prototipos de nanovacunas basadas en nanopartículas metálicas han reportado sus resultados contra la influenza (2015) y contra el dengue (2018). Aunque prometedores, estos prototipos deben ser probados en personas antes de poder comercializarse.

Antígeno
Sustancia o molécula que es reconocida como "extraña" por el organismo y que activa el sistema inmune para la generación de anticuerpos.

■ **Síntesis y funcionalización para posible uso como nanovacunas**

■ De manera breve, podemos decir que la síntesis de las nanopartículas metálicas, como las nanopartículas de oro (AuNP) y plata (AgNP), en el caso más sencillo, se lleva a cabo por reacciones de oxidación-reducción entre las sales del compuesto metálico y moléculas capaces de reducirlas. Ejemplos de sustancias reductoras empleadas son el ácido ascórbico, borohidruro de sodio y citrato. Por otra parte, la funcionalización de la nanopartícula se basa en el anclaje de **antígenos** a la superficie de la nanopartícula mediante moléculas conectoras que unen al antígeno con los grupos funcionales expuestos en la superficie de la AuNP. Incluso es posible la unión AuNP-antígeno mediante las interacciones electrostáticas existentes entre estos dos componentes.

Los antígenos utilizados por lo general se obtienen de la estructura del microorganismo (patógeno) que provoca la infección y, una vez anclados, son transportados y dirigidos a células específicas; entonces, se dice que la nanopartícula es el vehículo de entrega que además le confiere protección al antígeno durante su recorrido dentro del cuerpo hasta llegar al sitio de acción. La nanovacuna se integra por



dos componentes esenciales: el vehículo (que puede ser una nanopartícula de diferente origen químico) y el antígeno (que será específico de la enfermedad o patógeno). En nuestro grupo de investigación proponemos una síntesis simple de AuNP funcionalizada en una sola reacción, ya que el antígeno empleado es un péptido reductor, lo cual resulta novedoso porque no es necesario incorporar más sustancias para el anclaje del péptido a la superficie de la AuNP.

■ ¿Por qué usar nanopartículas de oro?

■ El oro (Au) es un metal con alto valor económico y ha sido, desde tiempos muy antiguos, un elemento asociado a la riqueza. Sin embargo, el oro empleado para la fabricación de prototipos de nanovacunas posee diferentes propiedades físicas de las que podríamos encontrar en artículos de joyería. Las AuNP que pueden emplearse para nanovacunas se obtienen de sales de oro que se encuentran en estado **coloidal**. Además, su síntesis tiene un bajo costo y su naturaleza química las hace compatibles con sistemas biológicos, como el cuerpo humano.

Finalmente, las AuNP poseen gran estabilidad y baja toxicidad dependiente de su tamaño. Por otro

lado, se consideran adyuvantes; es decir, potenciadores del sistema inmune (Burygin y cols., 2009; Dykman y cols., 2004; Dykman y Khlebtsov, 2017), debido principalmente a las características del oro, ya que la superficie de la AuNP puede presentar diversos grupos funcionales que interaccionan con el medio biológico. La capacidad de un adyuvante se clasifica por su entrega dirigida a células blanco o el direccionamiento de una respuesta inmune. En el caso de las nanopartículas, las funciones biológicas son dependientes de su tamaño, forma, carga, naturaleza, entre otras; por lo tanto, su capacidad adyuvante se relaciona con su capacidad de interactuar con el sistema inmune y con el transporte de antígenos.

Es necesario mencionar que todos los sistemas de nanopartículas con características orgánicas e inorgánicas tienen sus ventajas y desventajas. Para los grupos de investigación de este campo, resulta fundamental efectuar un análisis de las cualidades de los sistemas, los beneficios que ofrece y los posibles efectos no deseados.

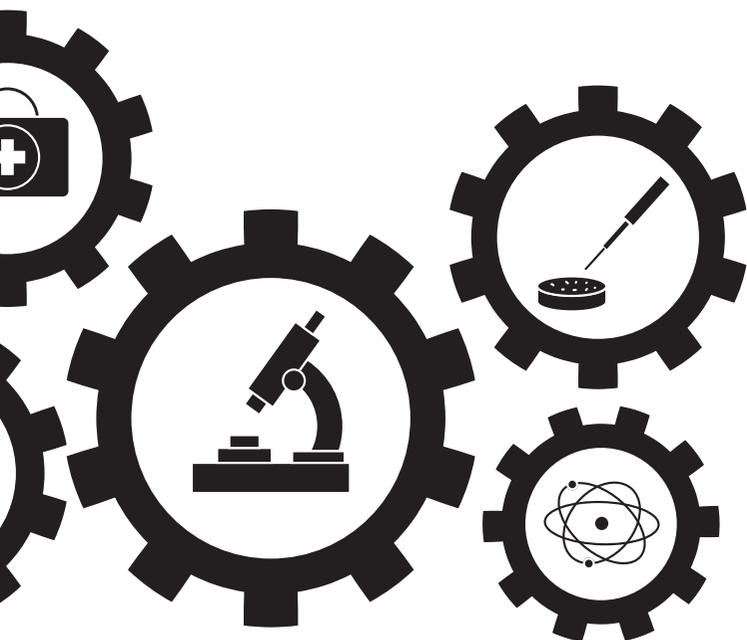
■ Prototipo de nanovacuna contra enfermedades gastrointestinales

■ Se sabe que muchas de las infecciones por bacterias Gram negativas son causantes de enfermedades gastrointestinales. *Vibrio parahaemolyticus*, que origina la vibriosis en crustáceos y peces, tiene una estructura que se distingue por poseer la proteína LptD en su membrana externa (al igual que *E. coli*). La proteína LptD contiene fragmentos (epítopes) compuestos por grupos capaces de reducir sales de oro (agentes reductores); esto hace posible la síntesis química de un prototipo de nanovacuna basada en oro (vehículo de entrega) y el antígeno de LptD. Si bien es cierto que esta bacteria afecta a organismos acuáticos, en humanos provoca gastroenteritis con síntomas como diarrea aguda y deshidratación. Por lo anterior, resulta importante conocer el mecanismo de acción de una nanovacuna candidata primero en mamíferos modelo y posteriormente en humanos, hasta poder considerarla segura y eficaz para su administración a la población.

El mecanismo de síntesis propuesto en nuestro grupo de investigación se basa en las reacciones de

◀ Coloidal

Sustancia en dos o más fases, normalmente en estado líquido y con partículas dispersas.



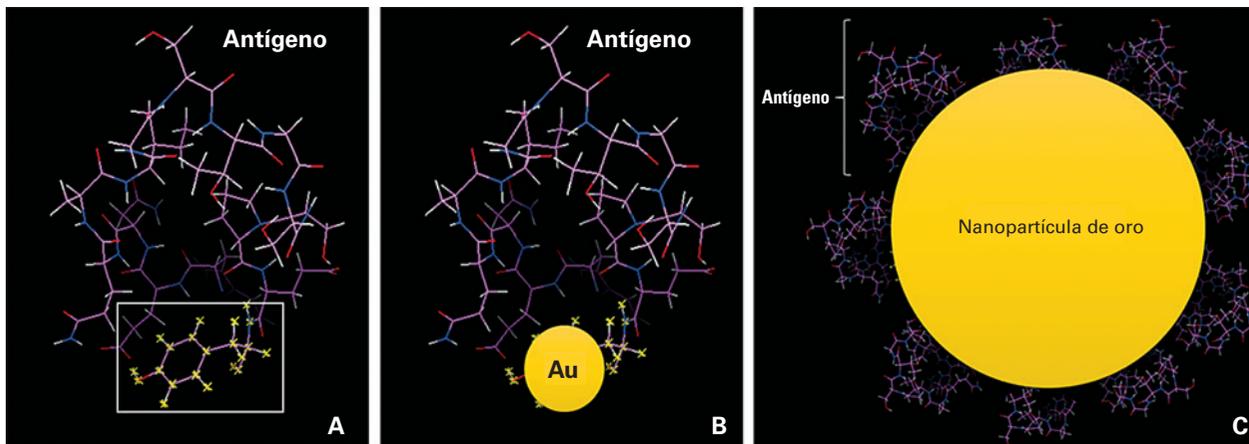


Figura 3. Mecanismo de síntesis del prototipo de nanovacuna: a) área de la estructura del antígeno con mayor afinidad para reducir oro; b) aglomeración de átomos de oro y crecimiento de la AuNP; c) estructura general del prototipo de nanovacuna. Fuente: Aguilera-Juárez (2020).

oxidación-reducción entre sales de metales y un epítopo del antígeno de LptD, con lo cual se consigue la formación de la AuNP y su funcionalización en un solo paso: las sales de oro empleadas (tetracloruro de oro, HAuCl_4) donan el catión oro (Au^+) que se reducirá (ganará cargas negativas, es decir, electrones) gracias al alto potencial reductor (proporcionarle gran número electrones) que poseen sitios específicos de la estructura del epítopo de LptD. Esto da lugar a una aglomeración de átomos de oro que formarán un cristal, al que llamamos “semilla”, que genera la formación de la AuNP.

De manera paralela, el resto de la estructura del epítopo se encontrará unida a la AuNP, con el resultado de un prototipo de nanovacuna estructurada contra

la vibriosis (véase la Figura 3). Este prototipo ha sido caracterizado fisicoquímicamente, encontrándose que tiene un diámetro de 40 a 50 nm (véase la Figura 4). El siguiente paso es evaluarlo a nivel preclínico en un modelo de ratón, con potencial para administración vía oral dadas sus características superficiales.

La AuNP será el vehículo para que el antígeno llegue al sitio de interés dentro del organismo vacunado. De esta manera, se espera que el antígeno sea reconocido por el sistema inmune para que comience a defenderse, ya que lo detectará como un agente extraño. La generación de anticuerpos específicos contrarrestará la infección; consecuentemente, las células de “memoria” detectarán a este antígeno y será más fácil atacar cuando el patógeno

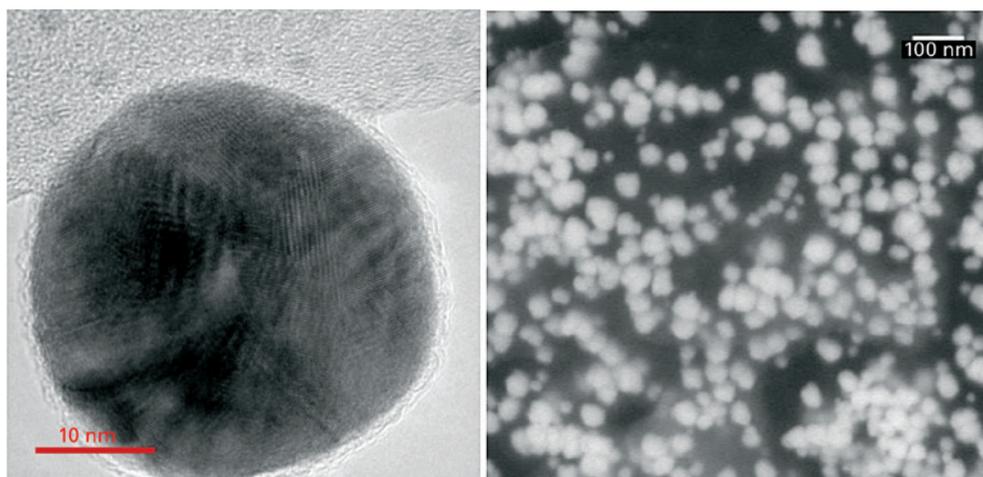


Figura 4. Micrografías del prototipo de nanovacuna contra *Vibrio parahaemolyticus*. Fuente: Aguilera-Juárez (2020).

no ingrese al cuerpo, lo que evita que se propicie la enfermedad.

■ Conclusiones y perspectivas

■ Las AuNP tienen varias aplicaciones biomédicas debido a su estabilidad, baja toxicidad, biocompatibilidad, fácil síntesis y funcionalización. Su empleo es una alternativa novedosa sujeta a estudio para la formulación de vacunas. La creación de un prototipo de nanovacuna oral basada en oro contra infecciones generadas por bacterias Gram negativas, como *V. Parahaemolyticus*, representa una posible opción para la prevención de enfermedades comunes adquiridas por la población. Sin embargo, aún hay un camino largo por recorrer para establecer que este prototipo de nanovacuna, así como los desarro-

llados por otros grupos de investigación, reúne los requisitos necesarios para poder ser administrada en humanos y poder cumplir así el objetivo primordial de hacerlas seguras, eficientes y accesibles a toda la población.

Ana Rosa Aguilera Juárez

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
aaguilera@pg.cibnor.mx

Carlos Eliud Angulo Valadez

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
eangulo@cibnor.mx

Luis Hernández Adame

Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste.
ladame@cibnor.mx

Referencias específicas

- Andrescu. D., T. K. Sau y D. V. Goia (2006), “Stabilizer-free nanosized gold sols”, *K Colloid Interface Sci*, 298:742-751.
- Burygin, G. L., B. N. Khlebtsov, A. N. Shantrokha, L. A. Dykman, V. A. Bogatyrev y N. G. Khlebtsov (2009), “On the enhanced antibacterial activity of antibiotics mixed with gold nanoparticles”, *Nanoscale Research Letters*, 4(8):794-801. Disponible en: <<https://doi.org/10.1007/s11671-009-9316-8>>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Delany, I., R. Rappuoli y E. de Gregorio (2014), “Vaccines for the 21st century”, *EMBO Molecular Medicine*, 6:708-720.
- Dykman, L. A., M. V. Sumaroka, S. A. Staroverov, I. S. Zaitseva y V. A. Bogatyrev (2004), “Immunogenic properties of the colloidal gold”, *Izvestiia Akademii Nauk. Serii Biologicheskaiia/Rossiiskaia Akademiia Nauk*, 31(1):86-91.
- Dykman, L. A. y N. G. Khlebtsov (2017), “Immunological properties of gold nanoparticles”, *Chemical Science*, 8(3):1719-1735. Disponible en: <doi.org/10.1039/c6sc03631g>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Jeevanandam, J., A. Barhoum, Y. S. Chan, A. Dufresne, y M. K. Danquah (2018), “Review on nanoparticles and nanostructured materials: History, sources, toxicity and regulations”, *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 9(1):1050-1074. Disponible en: <doi.org/10.3762/bjnano.9.98>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Kim, M. G., J. Y. Park, Y. Shon, G. Kim, G. Shim y Y. K. Oh (2014), “Nanotechnology and vaccine development”, *Asian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 9(5):227-235. Disponible en: <doi.org/10.1016/j.ajps.2014.06.002>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Rashmirekha P. et al. (2018), “Nanoparticle Vaccines Against Infectious Diseases”, *Frontiers in Immunology*, 9:2224.
- Salazar-González, J. A., O. González-Ortega y S. Rosales-Mendoza (2015), “Gold nanoparticles and vaccine development”, *Expert Review of Vaccines*, 14(9): 1197-1211. Disponible en: <doi.org/10.1586/14760584.2015.1064772>, consultado el 24 de agosto de 2020.
- Zhou, N. et al. (2006), “Enlargement of gold nanoparticles on the surface of a self-assembled monolayer modified electrode: A mode in Biosensor design”, *Anal Chem*, 78:5227-5230.

Mónica Vanessa Oviedo Olvera, Juan Fernando García Trejo y Claudia Gutiérrez Antonio



Mosca soldado negra: eslabón perdido en la cadena de revalorización de residuos orgánicos

La revalorización permite generar nuevos productos a partir de los residuos, los cuales representan un problema de contaminación. Existen diferentes procesos de revalorización, pero los biológicos han recibido gran atención. Por ello, en este artículo se presenta el uso de la mosca soldado negra como una estrategia eficiente para la revalorización de los residuos orgánicos.

Introducción

Como parte de las actividades cotidianas de la sociedad, se generan residuos, por ejemplo, cuando se bebe un refresco y desecha la botella plástica que lo contenía, o bien al tirar la cáscara de alguna fruta consumida. Los residuos se clasifican en dos grupos principales con base en su composición química y facilidad de degradación: inorgánicos y orgánicos. Los residuos inorgánicos son aquellos que no contienen carbono dado que no son de origen biológico y, por ello, tardan mucho tiempo en degradarse en el ambiente; dentro de este grupo se encuentran la botella plástica y el vidrio, así como los componentes electrónicos. En contraparte, los residuos orgánicos son aquellos que contienen carbono dado su origen biológico, por lo que logran descomponerse rápidamente en el ambiente; dentro de este grupo de residuos se encuentran las cáscaras de fruta, restos de comida procesada y verduras en mal estado, así como aquellos derivados de las actividades agropecuarias.

Sin importar si los residuos son orgánicos o inorgánicos, por lo general ambos son considerados basura, lo cual provoca un problema de contaminación. En particular, los residuos orgánicos se producen en mayor cantidad y representan más de la mitad de los desechos que se generan en el mundo. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), cada año se desperdicia un tercio de la comida para consumo humano que se produce



en el mundo. Para dimensionar el grave problema que esto representa, consideremos que la cantidad de comida que se desecha en los países más ricos es la misma que se produce en África para alimentar a su población (Quiñones, 2018).

Debido a esta situación, la disminución de la generación de residuos orgánicos, así como su manejo adecuado, se han convertido en tareas de interés global. Una de las estrategias más conocidas es la revalorización, que se define como el proceso mediante el cual los residuos son transformados en nuevos productos con el fin de satisfacer algunas de las necesidades de la sociedad. La revalorización di-

fiere del reciclaje de residuos en que este último hace referencia al procesamiento de los desechos para obtener el mismo producto; por ejemplo, los desechos de papel usado se pueden procesar para generar de nuevo papel útil; esto es reciclaje. En contraste, la conversión de residuos orgánicos en productos bioenergéticos es un claro ejemplo de la revalorización.

Los procesos de revalorización son específicos para cada tipo de residuo, ya que la composición de cada material es diferente. Existen muchas tecnologías que actualmente se usan en escala comercial para la revalorización de los residuos, con diversas ventajas y desventajas. No obstante, todas estas tecnologías tienen un efecto negativo en el ambiente debido a su consumo de energía, que en muchos de los casos es elevado y no necesariamente se garantizan altos rendimientos. Por ello, se han propuesto y analizado nuevas tecnologías amigables con el ambiente que permiten el máximo aprovechamiento de los residuos para la generación de nuevos productos y servicios.

Entre estas nuevas tecnologías, el tratamiento biológico de residuos ha capturado la atención de la comunidad científica. Este proceso consiste en el cultivo y crecimiento de organismos o microorganismos mediante el consumo de residuos orgánicos. El tratamiento biológico tiene varias ventajas, como la reducción en volumen de la materia orgánica, la estabilización de los componentes de los desechos, así como la destrucción de agentes patógenos presentes en los residuos. Como parte de los tratamientos biológicos, el uso de insectos es una alternativa factible y sustentable para la revalorización de residuos. Así, en este artículo se presenta información sobre el ciclo de vida de la mosca soldado negra (*Hermetia illucens*, Diptera: Stratiomyidae) y su aplicación en el tratamiento de residuos para la obtención de productos con valor agregado.



■ **Mosca soldado negra**

■ Con el objetivo de comprender cómo la mosca soldado negra se vincula con los procesos de reducción y revalorización de residuos, es importante conocer su origen y ciclo de vida. Esta especie, cuyo nom-



Figura 1. Comparación anatómica de la mosca soldado negra respecto a la mosca común. Fuente: elaboración propia.

bre científico es *Hermetia illucens*, se clasifica en el orden Diptera, el cual se conforma principalmente de insectos que cuentan con alas posteriores en su anatomía (véase la Figura 1). Físicamente se caracteriza por tener una estructura alargada en color negro, muy diferente a la mosca común. Este insecto se puede encontrar fácilmente en regiones de clima tropical y altas temperaturas; la primera vez donde se localizó fue en la isla Hilo en Hawái (Singh y Kumari, 2019).

El ciclo de vida de la mosca soldado negra consta de cinco etapas: huevecillo, larva, prepupa, pupa y adulta (véase la Figura 2); en total, dura aproximadamente de 10 a 31 días, pero puede extenderse hasta cinco meses por las condiciones ambientales en las que se encuentre, así como debido a la calidad y cantidad de alimento que consume este organismo (Makkar y cols., 2014). Por ejemplo, a bajas temperaturas y con poca disponibilidad de alimento, la mosca puede mantenerse en su estado larval hasta por cuatro meses, en comparación con las dos semanas que dura en esta etapa en condiciones óptimas. Esta fase es considerada la de mayor relevancia durante el desarrollo de la mosca, debido a que en la etapa larval logra aprovechar con mayor eficiencia los residuos con los que se alimenta.

Con respecto a la alimentación, las larvas de la mosca soldado negra son capaces de consumir casi cualquier tipo de materia orgánica, tanto alimentos en buenas condiciones como en descomposición, así como excremento y animales muertos. A pesar de alimentarse de este tipo de residuos, un aspecto interesante de este insecto es que no transmite pató-



Figura 2. Diagrama de las fases del ciclo de vida de la mosca soldado negra. Fuente: elaboración propia.

Pollinaza ▶
Excremento proveniente
de aves de corral.

genos; incluso se ha sugerido que en la larva existen de manera natural antibióticos, por lo que la inocuidad de su biomasa no se ve afectada (Makkar y cols., 2014). Así, la larva de esta mosca consume la materia orgánica y la convierte en biomasa para su crecimiento y en nutrientes de alta calidad.

Cabe mencionar que el tipo de nutrientes que genera depende del tipo de alimento que la larva consume; por ejemplo, cuando es alimentada con residuos de frutas puede producir 37.8% de proteína, mientras que cuando se le proporciona estiércol de animales puede producir hasta 44% de proteína (Wang y Shelomi, 2017). Además de proteínas, también se generan grasas durante el crecimiento de la larva de mosca. El contenido de grasas depende también del tipo de dieta; se ha reportado un porcentaje de grasa en la larva de 42-49% cuando es alimentada con residuos ricos en aceites, 35% con

estiércol bovino y 15-25% con **pollinaza** (Makkar y cols., 2014).

■ ■ ■ **Cultivo de la mosca soldado negra para el tratamiento de residuos**

■ El cultivo de la mosca soldado negra como una tecnología para la conversión de residuos es relativamente una técnica nueva. Las condiciones de cultivo que se han reportado hasta ahora requieren la introducción de la larva de mosca junto con el residuo en contenedores; éstos cuentan por lo general con una rampa por la que las larvas suben y se separan de los residuos antes de comenzar su estadio de pupa. Las condiciones de temperatura tienen un rango estrecho, entre 29 y 31 °C, al igual que la humedad relativa en la que deben ser cultivadas, de 50 a 70%. También se considera necesario mantener una colo-





nia de moscas adultas dentro de un invernadero de mínimo 66 m³ que permita el paso de luz natural; esto es para continuar con el ciclo de producción de huevo de mosca soldado. En adición, el invernadero deberá contar con un contenedor con **atrayente** para que las hembras depositen los huevos, y éstos puedan ser recolectados con facilidad (Makkar y cols., 2014).

En México, el cultivo de larva de mosca soldado negra es una tecnología que se encuentra en una etapa incipiente de desarrollo. Hasta el momento, sólo es cultivada en una planta a escala piloto, ubicada en el Laboratorio de Bioingeniería del Campus Amazcala de la Universidad Autónoma de Querétaro. Actualmente, dicha planta produce de 20 a 40 kg de biomasa a la semana, y continúa en proceso de investigación y desarrollo.

Un aspecto interesante de esta tecnología es que permite reducir de manera significativa el volumen de los residuos; el porcentaje de reducción dependerá del tipo de residuo, pero por lo general los resultados son favorables. Por ejemplo, residuos como estiércol de animales pueden reducirse hasta 63% en peso húmedo; residuos de vegetales, 74% en peso húmedo; mientras que los desechos de la industria cervecera hasta en 59%, también en base húmeda

(Gold y cols., 2018). Asimismo, es importante mencionar que los residuos que no son consumidos pueden emplearse como fertilizantes o mejoradores del suelo, en combinación con los productos sobrantes provenientes de la larva de mosca soldado negra, mejor conocido como Frass (Schmitt y Vries, 2020).

En la última década, la comunidad científica se ha dedicado al estudio de este insecto para conocer sus condiciones óptimas de crecimiento, así como tiempos de desarrollo. Uno de los intereses principales consiste en saber qué tipo de residuos puede consumir la larva y el efecto que éstos tendrán en la calidad y composición de su biomasa; por ejemplo, identificar si una dieta basada en residuos vegetales permitirá obtener una mayor cantidad de proteínas y grasas, en comparación con una dieta de residuos de frutas.

Es importante determinar el efecto que el tipo de alimentación tiene sobre el desarrollo de la larva de la mosca, ya que de esta manera será posible destinarla, de forma más específica, a la generación de nuevos productos. La extracción de sus nutrientes, tales como proteínas, grasas y carbohidratos, posibilitará su uso para la generación de productos con valor agregado, como suplementos alimenticios o bioenergéticos, entre otros.

Atrayente

Mezcla de sustancias que resultan agradables y atraen a los insectos.

■ **Revalorización de residuos**

■ El aprovechamiento de la larva de mosca para la generación de nuevos productos depende de su contenido nutricional. La larva de mosca contiene, en promedio, entre 32 y 58% de proteína y 15 a 39% de grasas (Gold y cols., 2018), dos de los nutrientes con mayor valor para la industria; además, contiene minerales, aminoácidos y carbohidratos, los cuales han permitido atribuirle diferentes aplicaciones distribuidas en los sectores económicos. No obstante, como se mencionó anteriormente, la composición exacta depende de las condiciones de cultivo, así como del tipo de residuo empleado para su alimentación.

Una de las aplicaciones que ha resultado atractiva es el uso de la larva como suplemento en la alimentación de peces, gallinas, porcinos y vacunos; de ahí que los esfuerzos del sector alimentario, en conjunto con investigadores, se han enfocado en la formulación de dichos alimentos y sus pruebas en los animales antes mencionados. El objetivo del sector alimentario es aprovechar el contenido de proteína y

carbohidratos principalmente, ya que estos nutrientes resultan vitales para la buena nutrición de animales. Hasta el momento se han reportado trabajos de investigación en los cuales la suplementación de larva de mosca seca en dietas animales no afecta su crecimiento y desarrollo (Wang y Shelomi, 2017). Sin embargo, no se han publicado efectos posteriores del uso de animales alimentados con larva de mosca soldado sobre la nutrición humana.

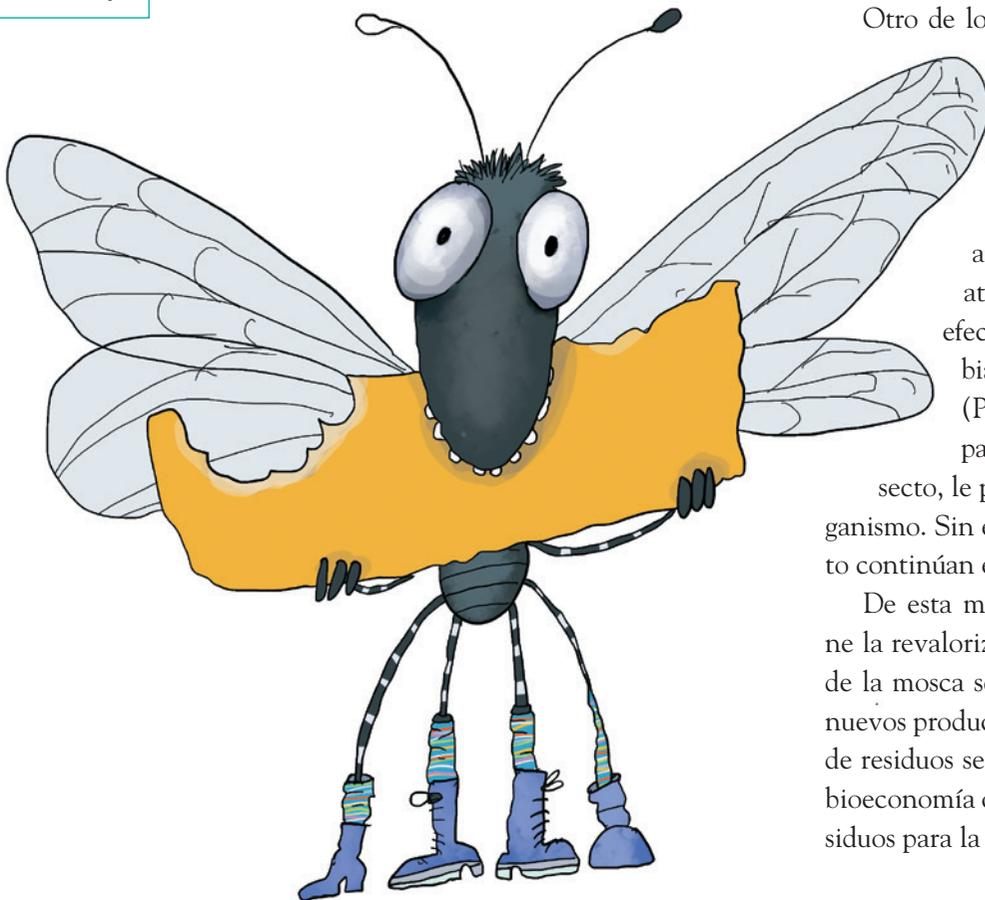
Otra aplicación que ha resultado interesante es la producción de biocombustibles, los cuales emergen como una alternativa de bajo impacto ambiental a los combustibles fósiles. Las grasas contenidas en la larva de mosca soldado negra se han estudiado como una materia prima para la síntesis de biodiésel. En este contexto se ha reportado que pueden producirse 43.8 g de biodiésel con el aceite contenido en 2 000 larvas de 0.25 g aproximadamente. Este rendimiento es considerado alto debido al gran contenido de **lignocelulosa** presente en el sustrato con el que fueron alimentadas. También es importante mencionar que dichas larvas se generaron a partir de 1 kg de estiércol (Sing y Kumari, 2019).

Otro de los productos de valor agregado derivados de la mosca soldado negra es la quitina, polisacárido de gran interés biotecnológico con interesantes aplicaciones en biomedicina, farmacéutica, alimentos e industrias ambientales; esto, debido a que se le han atribuido funciones como antioxidante, efecto antiinflamatorio, efecto antimicrobiano e inmunoestimulante, entre otros (Park y Kim, 2010). La quitina forma parte importante del exoesqueleto del insecto, le proporciona soporte y protección al organismo. Sin embargo, su extracción y procesamiento continúan en desarrollo (Diener y cols., 2011).

De esta manera, se ilustra el potencial que tiene la revalorización de residuos mediante el cultivo de la mosca soldado negra, lo cual permite generar nuevos productos. Cabe añadir que la revalorización de residuos se encuentra alineada al concepto de la bioeconomía circular, que considera el empleo de residuos para la generación de nuevos productos.

Lignocelulosa

Componente principal de la biomasa, proveniente de materia seca vegetal.



Conclusión

La revalorización de los residuos orgánicos es una alternativa viable para resolver el problema de contaminación que representan. De manera particular, una alternativa de revalorización es el cultivo de la mosca soldado negra, que es un tratamiento biológico para la reducción de residuos. Esta tecnología no sólo permite reducir el volumen de los residuos orgánicos, sino que también genera una biomasa que puede convertirse en productos de valor agregado o biocombustibles. A pesar de que esta tecnología se encuentra aún en desarrollo, se considera que tiene todo el potencial para convertirse en un eslabón esencial para la cadena de revalorización de residuos.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo económico brindado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología a la beca de manutención de Vanessa Oviedo para la realización de este trabajo.

Mónica Vanessa Oviedo Olvera

Universidad Autónoma de Querétaro.
mvanessaoviedo@gmail.com

Juan Fernando García Trejo

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

Claudia Gutiérrez Antonio

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

Referencias específicas

- Abdel-Shafy, H. I. y M. S. M. Mansour (2018), "Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization", *Egyptian Journal of Petroleum*, 27:1275-1290.
- Diener, S. et al. (2011), "Black soldier fly larvae for organic waste treatment – prospects and constraints", *Proceedings of the WasteSafe 2011 – 2nd International Conference on Solid Waste Management in the Developing Countries*, 52:1-8.
- FAO (2017), "Pérdidas y desperdicios de alimentos en América Latina y el Caribe", *Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura*. Disponible en: <<http://www.fao.org/3/a-i7248s.pdf>>, consultado el 5 de febrero de 2020.
- Gold, M., J. K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg y A. Mathys (2018), "Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review", *Waste Management*, 82:302-318.
- Graziani, P. (2018), *Economía circular e innovación tecnológica en residuos sólidos: oportunidades en América Latina*, Caracas, Banco de Desarrollo de América Latina/Corporación Andina de Fomento.
- Makkar, H. P., S. G. Tran, V. Hauzé y P. Ankers (2014), "State-of-the-art on use of insects as animal feed", *Animal Feed Science and Technology*, 197:1-33.
- Park, B. K. y M. M. Kim (2010), "Applications of chitin and its derivatives in biological medicine", *International Journal of Molecular Sciences*, 11:5152-5164.
- Quiñones, L. (2018), "El desperdicio de comida, una oportunidad para acabar con el hambre", *Noticias ONU*. Disponible en: <<https://news.un.org/es/story/2018/10/1443382>>, consultado el 5 de febrero de 2020.
- Schmitt, E. y W. de Vries (2020), "Potential benefits of using *Hermetia illucens* frass as a soil amendment on food production and for environmental impact reduction", *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25:100335.
- Singh, A. y K. Kumari (2019), "An inclusive approach for organic waste treatment and valorization using Black Soldier Fly larvae: A review", *Journal of Environmental Management*, 251:105569.
- Wang, Y. S. y M. Shelomi (2017), "Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food", *Foods*, 6:1-23.

La (divulgación de la) técnica al servicio de la patria

Se plantean diferencias elementales entre los conceptos de comunicación y divulgación de la ciencia. En el CITEDI-IPN se presentan varios esfuerzos de divulgación y se propone la vinculación con la sociedad como una forma de acercar el conocimiento al público. Urge impulsar e incrementar este tipo de actividades para contrarrestar la diseminación de falsedades en las redes sociales y medios convencionales.

Comunicación de la ciencia

Un precepto de la investigación científica es comunicar sus resultados. Las comunicaciones científicas mejoran y completan los conocimientos generados al fomentar el intercambio de ideas entre colegas. La principal característica de esta comunicación es que se lleva a cabo en ambos sentidos: hay exposición, retroalimentación, preguntas, respuestas y conclusión. En cambio, si algo no se comunica es como si no hubiera sucedido. Para la comunidad científica es claro que quien no comunica no crece intelectualmente, no trasciende, académicamente no existe. No es extraño ni es reciente que las publicaciones sean uno de los principales criterios con los cuales se evalúa el trabajo de investigación.

Durante siglos, los científicos se comunicaron entre sí de manera oral, cara a cara, o bien mediante el intercambio de manuscritos. La interacción con colegas que no vivieran en la misma región era algo muy complicado. Hasta la segunda mitad del siglo XIX, con la invención del teléfono, fue posible la comunicación a larga distancia de manera inmediata, así fuera únicamente de forma oral. Pero la comunicación científica escrita seguía siendo lenta. Esto cambió drásticamente a partir de la primera mitad del siglo XX. La transportación terrestre mejoró y se hizo mucho más rápida y eficiente. Más adelante surgió la transportación aérea, que paulatinamente fue haciéndose cada vez mejor, lo que facilitó el movimiento de grandes cantidades de documentos impresos de un país a otro, de un continente a otro.

Pero no fue sino hasta la segunda mitad del siglo XX que la aparición de diferentes adelantos tecnológicos facilitó no sólo la comunicación, sino también la



rápida diseminación de la información: fax, correo electrónico, internet, mensajería instantánea y una enorme variedad de medios digitales. La transición de medios analógicos tradicionales a medios digitales se dio en un lapso inusitadamente corto; surgieron libros y revistas electrónicos, sitios, portales y redes sociales especializados. La facilidad para comunicar los resultados de la investigación generó un efecto sinérgico: el desarrollo de la mayoría de los campos del conocimiento adquirió velocidades inauditas y la cantidad de información generada y publicada creció de manera más que exponencial, toda ella disponible al mismo tiempo y con sólo unos cuantos *clicks*.

Divulgación de la ciencia

Sin embargo, las comunicaciones científicas se dan en un lenguaje que por lo general no es entendible para las personas que no son especialistas; por ello, la ciencia termina resultándole indiferente al público lego, porque le es incomprensible y totalmente ajena. Pero en algún momento de la historia surgió la idea de hacer el conocimiento científico más accesible y entendible para la población en general. Cuando esto sucedió, el conocimiento se convirtió

en parte de la cultura. Así, la ciencia se vuelve más interesante para todas las personas y adquiere una nueva dimensión.

El *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo Tolemaico e Copernicano*, de Galileo Galilei, publicado en 1632, es considerado como el primer intento para divulgar el conocimiento científico debido a que no fue escrito en latín —el idioma científico de la época—, sino en italiano. Probablemente la intención de Galileo no era que el pueblo conociera sus teorías, sino conseguir recursos económicos de algún mecenas, para lo cual era necesario explicarle la astronomía. Como consecuencia de su publicación, o por moda, en el siglo XVII se organizaron por primera vez jornadas de observación astronómica, exposiciones de inventos, tertulias, ferias y gabinetes de curiosidades, entre otros, para seducir a los públicos y lograr respaldo y mecenazgos (Daza y Arboleda, 2007).

Pero los primeros intentos formales y sistemáticos para verdaderamente acercar el conocimiento científico al público en general llegaron 250 años más tarde, con las revistas *Scientific American*, fundada en 1845, *Popular Science*, creada en 1872, y *National Geographic*, fundada en 1888. Las tres se especializan en la publicación de notas sobre ciencia y tecnolo-



DIALOGO

DI
GALILEO GALILEI LINCEO
MATEMATICO SOPRAORDINARIO
DELLO STUDIO DI PISA.

*E Filosofo, e Matematico primario del
SERENISSIMO*

GR. DVCA DI TOSCANA.

*Due ne i congressi di quattro giornate si discorre
sopra i due*

MASSIMI SISTEMI DEL MONDO
TOLEMAICO, E COPERNICANO;

*Proponendo indeterminatamente le ragioni Filosofiche, e Naturali:
tanto per l'una, quanto per l'altra parte.*

CON PRI VILEGI.



IN FIRENZA, Per Gio: Batista Landini MDCXXXII.

CON LICENZA DE' SUPERIORI.

gía dirigidas a lectores en general y siguen vigentes hoy, se publican en más de 30 idiomas con tirajes, precios y estrategias de distribución que cumplen cabalmente con la función de diseminar el conocimiento. Además, los avances tecnológicos en las comunicaciones también son aprovechados para la divulgación de la ciencia, que ahora tiene a su disposición *blogs*, *podcasts*, canales de YouTube, redes sociales y presencia en medios. Por eso, la cantidad de publicaciones de divulgación científica también ha crecido a un ritmo más que exponencial.

Divulgación de la ciencia en el IPN

 Desde luego, el Instituto Politécnico Nacional (IPN) no es ajeno a la realidad de la vida académica, en virtud de la cual los profesores-investigadores de “el Poli” son evaluados con base en la publicación de comunicaciones científicas, considerando el número y el impacto de los artículos, así como los diferentes medios en los que aparecen. ¿Pero qué sucede con referencia a la divulgación?

El IPN tiene como lema “La técnica al servicio de la patria”, y en este sentido no ha descuidado la divulgación. Para esta tarea creó el Centro de Difusión de Ciencia y Tecnología (Cedicyt), que lleva a cabo su misión mediante el Planetario “Luis Enrique Erro”, el Museo Tezozómoc y la revista *Conversus*. El planetario tiene un enfoque evidente hacia la divulgación de la astronomía. Por su parte, siguiendo la vocación tecnológica del IPN, el museo está dedicado a acercar a sus visitantes a diversos conceptos de la física. En tanto, la revista es el medio de difusión más abierto a la ciencia y tecnología en general con el que cuenta el Poli.

Conversus es un proyecto multiplataforma que incluye una revista y se expande en el ambiente digital por medio de las redes sociales, entre las cuales destaca el canal en YouTube *ConversusTV*, dirigido a jóvenes interesados en ampliar su perfil cultural con contenidos científicos, tecnológicos y sociales para incentivar la curiosidad por la tecnología y descubrir sus vocaciones. Además, se cuenta con Radio IPN y el Canal Once, ambos con la misma facilidad que *Conversus* para difundir una amplia gama temática y

que, junto con el planetario, son las “estrellas” en el tema de la divulgación para un público amplio.

Divulgación en el CITEDI-IPN

 En el ámbito de las unidades académicas del Instituto (escuelas, centros y unidades), la mayoría cuenta con una Unidad Politécnica de Integración Social (UPIS) que, entre sus funciones, organiza una serie de actividades en su respectiva sede para difundir la cultura, la ciencia y la tecnología en el contexto nacional, regional o local. Como parte de la representatividad que el IPN tiene en el país, en Tijuana se ubica el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital (Citedi) que, después de 35 años, es el principal forjador de recursos humanos especializados (posgrados) en sistemas digitales en el noroeste de México y un referente de la investigación en ese tema en la región conocida como Cali-Baja. Los esfuerzos de divulgación del Citedi se han concentrado en el nivel superior, mediante la organización y participación en ferias, jornadas y, en general, eventos encaminados a atraer estudiantes para los posgrados que se ofrecen.

-  Descubre tu Posgrado es un evento en el cual profesores-investigadores del Citedi imparten pláticas dirigidas a estudiantes recién egresados o próximos a terminar su carrera en alguna ingeniería. El objetivo es presentarles el Centro, sus instalaciones, el quehacer diario de sus investigadores y la filosofía del IPN con relación a la formación de recursos humanos, la investigación científica y el desarrollo tecnológico, todo con la intención de atraerles hacia un posgrado en el Citedi.
-  Los Seminarios de Primavera y Otoño sobre Sistemas Digitales son eventos de divulgación para el nivel superior, por lo que no ofrecen el típico programa de divulgación popular, ya que los temas, las presentaciones y las discusiones requieren de una formación científica más avanzada y más especializada. Aunque una línea muy delgada separa estos seminarios de los eventos académicos, se consideran como de divulgación por-



que los expositores son estudiantes de posgrado y hacen la presentación en un lenguaje para todo público. El objetivo es doble: atraer a jóvenes estudiantes hacia la ciencia en sistemas digitales y exponer a los estudiantes del posgrado al ejercicio de la divulgación.

- Expo-Tracks está enfocado a hacer demostraciones de prototipos desarrollados como resultados de la investigación científica, pero llevados a un auditorio y acercados a docentes universitarios. De nuevo, el objetivo es impresionar a la audiencia para interesarla en los sistemas digitales.
- La Ciencia viene al Tec fue una actividad conjunta con los Institutos Tecnológicos Superiores de Abasolo, Guanajuato e Irapuato en 2019. Consistió en una jornada donde profesores del Citedi dieron charlas de divulgación y talleres a estudiantes de esos institutos.

La experiencia con estos programas llevó a concluir que Descubre tu Posgrado y Expo-Tracks cumplieron su ciclo. Por ello, se concibió un evento dirigido a recién egresados o próximos a egresar de las carreras de ingeniería. A partir de febrero de 2019 se organizó el “CafeCyTo, con dos cucharadas de ciencia y espacio para un chorrillo de tecnología”. En una cafetería y bajo el eslogan “¿Qué es más estimulante, la investigación o el café?”, se lleva a cabo una charla mensual en la cual un investigador o una investi-

gadora del Citedi explica al auditorio, sin términos técnicos y en un ambiente informal y relajado, cómo y por qué se inició en la investigación y cuál es su quehacer diario.

El Citedi también participa en la divulgación por medio de demostraciones de ciencia y tecnología al público no académico, principalmente de niveles educativos básico hasta medio superior.

- En Tijuana, la Semana Nacional de Ciencia y Tecnología (conocida como La Semana) era coordinada por El Trompo Museo Interactivo, institución con la cual el Centro siempre ha mantenido una activa y estrecha colaboración como asesor y como miembro de su Comité Educativo. Como parte de las actividades de La Semana son de resaltar las visitas guiadas de estudiantes de primarias, secundarias y preparatorias a los laboratorios del Citedi.
- BajaBot, también organizado por El Trompo, se trata de torneos anuales en los que se inscriben equipos de estudiantes de niveles medio superior, superior y posgrado, para poner a competir robots diseñados y construidos por ellos mismos. Citedi ha participado con equipos del nivel posgrado y también ha presidido el Comité Organizador.
- Selección de las Profesiones del Futuro fue una serie de pláticas dirigidas a mujeres de 13 a 18 años, en colaboración con El Trompo durante 2019. En

estas charlas, profesionales mexicanas líderes en sus campos del conocimiento platicaron con el auditorio sobre las razones por las cuales se dedicaron a la ciencia, a la tecnología o a crear su propia empresa. Al mismo tiempo, exhortaban a las asistentes no sólo a continuar con sus estudios en una carrera universitaria, sino también a olvidar los estereotipos y elegir una profesión acorde con sus deseos y capacidades.

Vinculación con la sociedad como una forma de divulgación

El Citedi ha sido muy activo como miembro de diversos comités de organizaciones locales dedicadas a la enseñanza y a la difusión del conocimiento y la cultura. Dos de estas organizaciones son Tijuana Innovadora, A. C., creada para impulsar la innovación social y creativa, con el objetivo de elevar la calidad de vida de los tijuanaenses; así como el Patronato Zócalo 11 de Julio, A. C., creado con fines de promoción de la convivencia social y cultural en Tijuana. Ambas organizaciones tienen un gran prestigio local por su aportación al mejoramiento de la imagen de Tijuana ante el mundo.

Una actividad paralela a la divulgación es la Carrera y Caminata Politécnica que Citedi organiza cada año. Si bien el objetivo no es difundir los conocimientos generados en el Centro, sí ha cumplido con la tarea de dar a conocer su existencia entre una comunidad cada vez mayor de tijuanaenses. Estas actividades se consideran y reportan como esfuerzos de vinculación con la sociedad. ¿Por qué darle importancia a este tema si lo lógico sería vincularse con el sector industrial? La filosofía que mueve al Citedi, como parte del IPN, es que tiene la obligación de retribuir de alguna manera a la comunidad más allá de generar conocimiento y de publicar en revistas especializadas.

La vinculación con la sociedad no es un subproducto de la vinculación con el sector productivo. Debe tener objetivos y metas propios porque, por su naturaleza, no está sujeta a los rigores de generación de riqueza que tiene la vinculación con el sector empresarial. La vinculación con la sociedad consis-

te en mostrar el quehacer diario de investigación a un público que no tiene idea de lo que significa el quehacer científico. Se trata, incluso, de generar vocaciones y lograr que los jóvenes se enamoren de la investigación. En tal virtud, está ligada con la divulgación de la ciencia que realiza la institución y con la participación de sus miembros en museos, foros, ferias, talleres, visitas guiadas y exposiciones, o bien al aportar ideas para mejorar las exposiciones en museos y actualizarlas para el siglo XXI. Así, la filosofía y estrategia del Citedi se basan en que, gracias a la divulgación y a los avances en las tecnologías de la comunicación, el conocimiento científico debe ponerse al alcance de la mayoría de la población.

Obstáculos para la divulgación de la ciencia

Como ya se mencionó, algunos esfuerzos de divulgación presentados por el Citedi llegaron a un punto en el cual ya no daban los resultados esperados, o bien no han terminado de despegar.

Las razones para el cierre temprano o para el despegue tan lento (o “no despegue”) de estos esfuerzos

Técnicamente un paso adelante

EXPO

Profesiográfica
Nivel Medio Superior

- Oferta educativa
- Talleres
- Conferencias
- Simulador de conocimientos
- Orientación vocacional

Registro en: ipn.mx/dems/

MODALIDAD PRESENCIAL
Del 10 al 16 de enero de 2022,
de 9 a 18 horas.

Modalidad en línea del 10 al 22 de enero de 2022, de 9 a 18 horas.

SEDE: Centro Histórico y Cultural "Juan de Dios Ballesteros" (Cuadrilátero), Promoción de Caspiro y Lucre Aguirre s/n, Casco de Santo Tomás, Alcaldía Miguel Alemán, C.P. 23540, Ciudad de México.

ESTE PROGRAMA ES FINANCIADO POR EL GOBIERNO FEDERAL A TRAVÉS DEL INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS Y TECNOLÓGICAS (CONACYT) Y LOS ESTABLECIMIENTOS DEL IPN.

EDUCACIÓN
INSTITUTO PÚBLICO NACIONAL
"La Técnica al Servicio de la Patria"

seguramente son de diversa índole. Quizá se han realizado acciones de divulgación esperando resultados de reclutamiento, o bien han sido actividades de reclutamiento que fueron llamadas de divulgación. Por definición, la divulgación está dirigida al público en general, de todas las edades, pero la mayoría de los eventos de divulgación del Centro han estado enfocados a un público más específico: adultos jóvenes, estudiantes de algunas ingenierías, recién egresados o a punto de serlo, así como interesados en cursar un posgrado; es decir, posibles candidatos a estudiar en el Citedi. Con estas restricciones, el universo objetivo es muy reducido, por lo que no puede esperarse que una muestra de dicho universo sea una multitud.

Por otra parte, Descubre tu Posgrado y Expo-Tracks fueron eventos llevados a cabo en las instalaciones del Citedi dos meses antes del final de los semestres académicos porque estuvieron dirigidos hacia estudiantes de ingeniería próximos a terminar la carrera. En ese sentido, al igual que los Seminarios de Primavera y Otoño, los eventos conservaron un grado de formalidad en las presentaciones que les daba sabor de evento académico. En cambio, el CafeCyTo se planeó como un evento mensual sin rigores académicos, como una charla para comentar sobre los inicios en la investigación, reflexionar por qué es apasionante y, sin tecnicismos, explicar qué es lo que se hace diariamente. Además, se pensó en hacerlo en una cafetería para quitarle cualquier aroma de evento académico. Quizá este toque de “informalidad” operó en contra de las expectativas, pues es más fácil no ir a un café científico y dejarlo “para la próxima”, sin que quede una sensación de haberse perdido un evento importante.

Un argumento para explicar la poca asistencia de estudiantes al CafeCyTo es tanto por el costo de los traslados como por las dificultades para conseguir transporte al concluir la charla. Aunque éstas se llevan a cabo en una cafetería cercana al Citedi, al Campus Tijuana de la Universidad Autónoma de Baja California y a ambos campus del Instituto Tecnológico de Tijuana, el transporte público después de las 20:00 h en la ciudad es muy escaso. Además, como las charlas son en una cafetería, está implícita

la obligación de consumir, lo cual es difícil con el presupuesto de un estudiante de licenciatura.

También resalta la dificultad de convencer a los investigadores del Centro para dar una plática de divulgación. Las razones exhibidas van desde complicaciones con el horario de la plática y falta de tiempo, hasta un rotundo (pero honesto) “no me interesa”. Esto concuerda con estudios que demuestran que, en México, los investigadores por lo general desdeñan la divulgación de la ciencia (Sanz y Tarhuni, 2018), aunque la consideran importante y reconocen que requiere de su participación. Pero la razón más fuerte para hacer a un lado la divulgación puede ser el poco valor curricular que se le da en los sistemas que evalúan a los investigadores. Si tienen que escoger entre publicar un artículo científico o uno de divulgación, o si tienen que decidir entre dedicarle tiempo a su investigación en el laboratorio o dedicarle tiempo a una feria de ciencias, es muy probable que la primera opción en cada comparativa sea la elegida.

En este contexto, no resultan extraños los resultados de la *Encuesta sobre la percepción pública de la ciencia y la tecnología* que llevó a cabo el Inegi en 2015. Destaca de manera importante que 70% de las personas encuestadas considera que la comunidad científica no se preocupa por informar al público sobre su trabajo. Esto no es trivial; la investigación genera conocimiento y lo hace saber a sus pares, pero la vinculación lo dirige hacia la generación de riqueza y satisfactores, mientras que la divulgación lo lleva al nivel popular para hacerlo parte de la cultura y de la vida cotidiana, lo que es fundamental para el desarrollo de la sociedad.

■ ■ ■ La divulgación de pseudociencias

■ Hoy día circula una enorme cantidad de falsedades en los medios de comunicación, principalmente en las redes sociales y en internet (Vosoughi y cols., 2018). Por ello, es apremiante que la comunidad científica tome en serio su papel para contrarrestar movimientos como los antivacunas, los terraplanistas, los promotores de productos milagrosos y los complotistas. Estas corrientes podrían ser anecdóti-

cas, intrascendentes y hasta divertidas, si no fuera porque la difusión de falsedades resulta peligrosa. Esas patrañas pueden tener consecuencias catastróficas en todos los ámbitos (economía, política, ciencia, tecnología, cultura, desastres naturales, salud, seguridad nacional, etc.) porque perpetúan la ignorancia, además de originar conductas tanto de odio como de pánico, o bien de desprecio a indicaciones serias de expertos (en salud o seguridad, por ejemplo); cabe señalar que la desinformación también alcanza a tomadores de decisiones que desdennan las opiniones de especialistas y descalifican las evidencias acumuladas por décadas. La ciencia y la evidencia son descartadas para definir estrategias y políticas, decidir rumbos y proponer soluciones. Las creencias y el instinto propios se vuelven el criterio y la norma, con resultados muy desafortunados.

Para revertir esta situación, el paso más obvio es la contribución decidida de la comunidad científica para llevar a cabo actividades de divulgación, no sólo mediante su participación en charlas y eventos, sino también diciendo la verdad en los medios y las redes sociales propias, de instituciones o de grupos serios organizados para tal efecto. Pero eso no pasará en nuestro país si a la divulgación no se le da valor curricular, pues la política de ciencia y tecnología de México parece darle valor real a la investigación, valor a medias a la vinculación y valor platónico a la divulgación. Lo paradójico es que presentar el conocimiento científico en un lenguaje común, con imágenes atractivas y entendibles, hacerlo entretenido y, además, hacerlo bien, es un reto formidable que requiere de la participación de una gran cantidad de especialistas y no sólo de la persona que generó el conocimiento que se desea divulgar (Bonfil, 2018).

La divulgación es un “nuevo reto añejo” para el Citedi-IPN, pero es un desafío que debe ser asumido con decisión. Es imprescindible educar en ciencia y tecnología a la población en general. Si la investiga-

ción científica y el desarrollo tecnológico no pueden tener aplicaciones en el futuro cercano, al menos deben divulgarse de manera masiva. La perspectiva en sentido contrario es de terror.

Enrique Estrada Loera

Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital, Instituto Politécnico Nacional.

subdir.vinculacion@citedi.mx

Referencias específicas

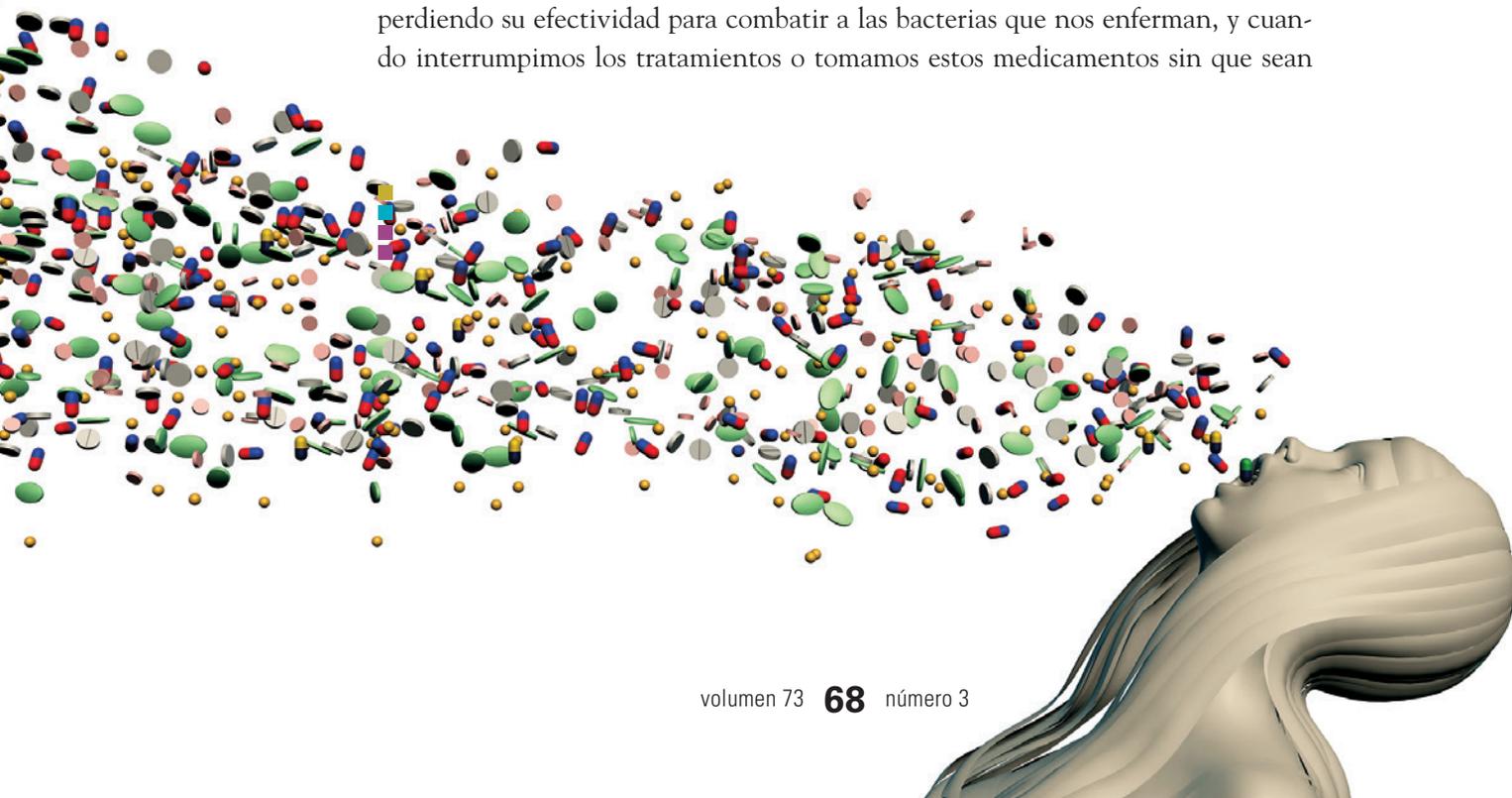
- Bonfil, M. (2018), “¿Quién divulga la ciencia?”, *La Ciencia por Gusto*. Disponible en: <https://lacienciapor gusto.blogspot.com/2018/07/quien-divulga-la-ciencia.html>, consultado el 15 de marzo de 2020.
- Daza, S. y T. Arboleda (2007), “Comunicación pública de la ciencia y la tecnología en Colombia: ¿políticas para la democratización del conocimiento?”, *Signo y Pensamiento*, 25(50):100-125. Disponible en: <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/signo-y-pensamiento/article/view/4616>, consultado el 3 de abril de 2020.
- Inegi (2017), *Encuesta sobre la percepción pública de la ciencia y la tecnología (ENPECYT) 2015*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/temas/default.aspx?s=est&c=19007>, consultado el 27 de abril de 2020.
- IPN (2020), *Centro de Difusión de Ciencia y Tecnología*. Disponible en: <https://www.ipn.mx/cedicyt/>, consultado el 15 de marzo de 2020.
- IPN (2020), *Instituto Politécnico Nacional*. Disponible en: <https://www.ipn.mx/>, consultado el 30 de marzo de 2020.
- Sanz Merino, N. y D. H. Tarhuni Navarro (2018), “Attitudes and perceptions of Conacyt researchers towards public communication of science and technology”, *Public Understanding of Science*, 28(1): 85-100.
- Vosoughi, S., D. Roy y S. Aral (2018), “The spread of true and false news online”, *Science*, 359(6380): 1146-1151.

Karla Estephanía Zarco González, Martha M. Zarco González y Zuleyma Zarco González

La resistencia a los antibióticos: ¿el retorno a las enfermedades incurables?

En el marco del final de la Segunda Guerra Mundial, Alexander Fleming era elogiado y reconocido por el descubrimiento de la penicilina. En ese entonces parecía que podíamos curar todas las enfermedades, incluso las que no conocíamos. Seguramente él nunca imaginó que el abuso de su descubrimiento nos llevaría a enfrentar una nueva guerra: la resistencia bacteriana.

Al menos en una ocasión a lo largo de tu vida has tomado antibióticos. Estos medicamentos se utilizan para combatir enfermedades producidas por bacterias, pero ¿cuántas veces has interrumpido tu tratamiento porque ya te sientes mejor? o ¿cuántas veces has tomado antibióticos para aliviar una gripe? Hoy día el mundo enfrenta un grave problema, pues los antibióticos están perdiendo su efectividad para combatir a las bacterias que nos enferman, y cuando interrumpimos los tratamientos o tomamos estos medicamentos sin que sean





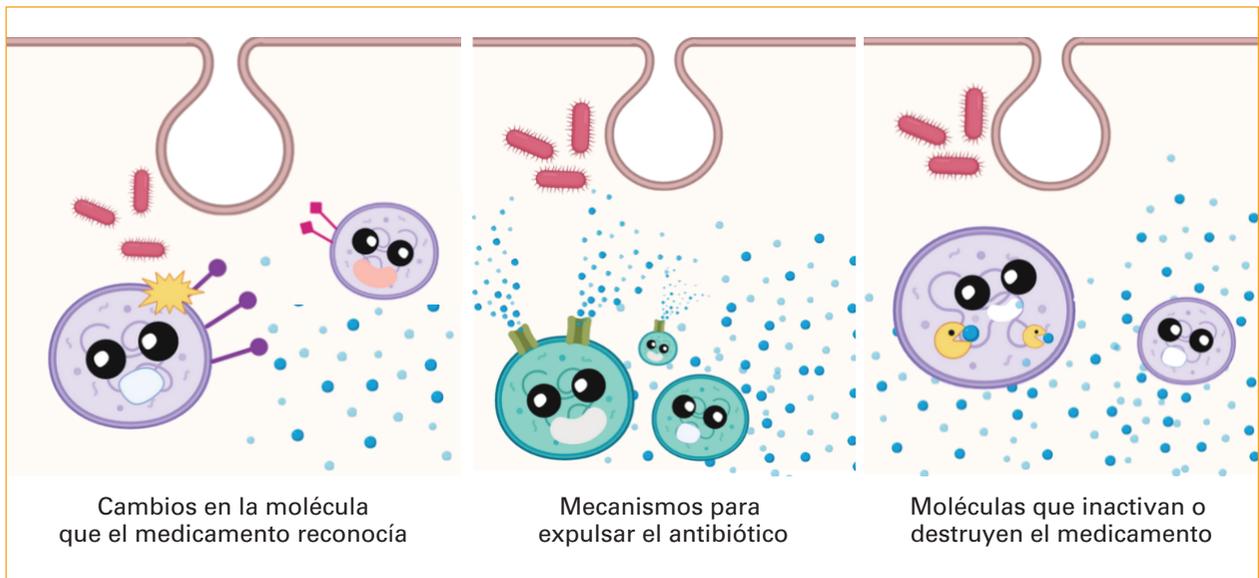


Figura 1. Mecanismos de resistencia. Fuente: elaboración propia.

necesarios, estamos contribuyendo a que el problema crezca (OMS, 2020).

■ ■ ■ ¿Cómo ocurre la resistencia a los antibióticos?

■ Cuando los antibióticos actúan en nuestro cuerpo matan a las bacterias que nos invaden. Sin embargo, debido a la evolución, que permite a los organismos cambiar y adaptarse con nuevas características, algunas de estas bacterias pueden sobrevivir y volverse más resistentes (Ben y cols., 2019; NIH, 2011).

Las razones por la que estas bacterias sobreviven pueden ser variadas, ya que hay diferentes mecanismos de resistencia (véase la Figura 1). El primero de ellos es cuando cambia la molécula “blanco” que el medicamento reconocía en la bacteria, por lo que el antibiótico ya no puede reconocerla ni atacarla. En otros casos, las bacterias tienen mecanismos que les ayudan a expulsar el medicamento de su organismo y de esta manera evitan que las mate. Incluso pueden llegar a desarrollar sistemas que directamente destruyen o inactivan al antibiótico (Lorenzo y cols., 2008; Martínez y Calvo, 2010).

Todos estos mecanismos se encuentran “escritos” en el ADN de las bacterias resistentes, por lo que pueden transferir las características ventajosas a su descendencia. Aunque lo anterior nos puede

sonar fascinante y aterrador al mismo tiempo, la resistencia de las bacterias a los antibióticos es algo natural; el problema es que, con el uso inadecuado de estos medicamentos, estamos acelerando el desarrollo de esa resistencia y podemos llegar a comprometer la salud humana de manera grave (Forbes, 2009).

■ ■ ■ ¿Cuáles son las causas del problema?

■ Entre los principales usos inapropiados de los antibióticos se encuentran la automedicación, la suspensión del tratamiento antes de tiempo, el consumo incorrecto de antibióticos para tratar enfermedades que ni siquiera son causadas por bacterias, así como su uso en actividades agropecuarias. En algunos casos, cuando un grupo de bacterias entra a nuestro cuerpo y nos enferma, nuestro sistema inmunitario, o de defensa, tiene la capacidad de combatirlos sin la necesidad de los antibióticos; por eso, cuando nos enfermamos debemos buscar atención médica para saber cuándo sí y cuándo no tomarlos.

Además, antes de medicarnos es importante saber si lo que nos está enfermando es una bacteria, un virus o un hongo; muchas veces los antibióticos se usan de forma equivocada para tratar enfermedades como el catarro común, aun cuando esta enfermedad es causada por un virus y no por una bacteria

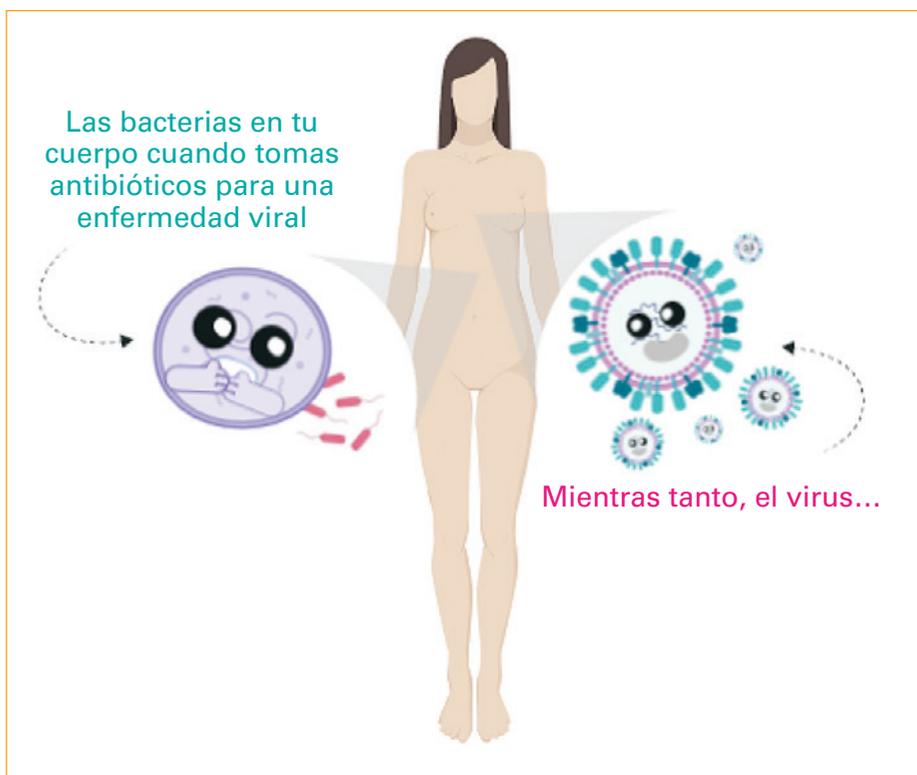


Figura 2. Efecto de la automedicación. Fuente: elaboración propia.

(NIH, 2011; CDC, 2020). Básicamente estamos tomando un medicamento que no nos puede curar. Entonces, además de que la enfermedad continúa, se está generando una exposición innecesaria de las bacterias al antibiótico, lo que aumenta la probabilidad de que alguna de ellas desarrolle resistencia y enferme a más personas (véase la Figura 2).

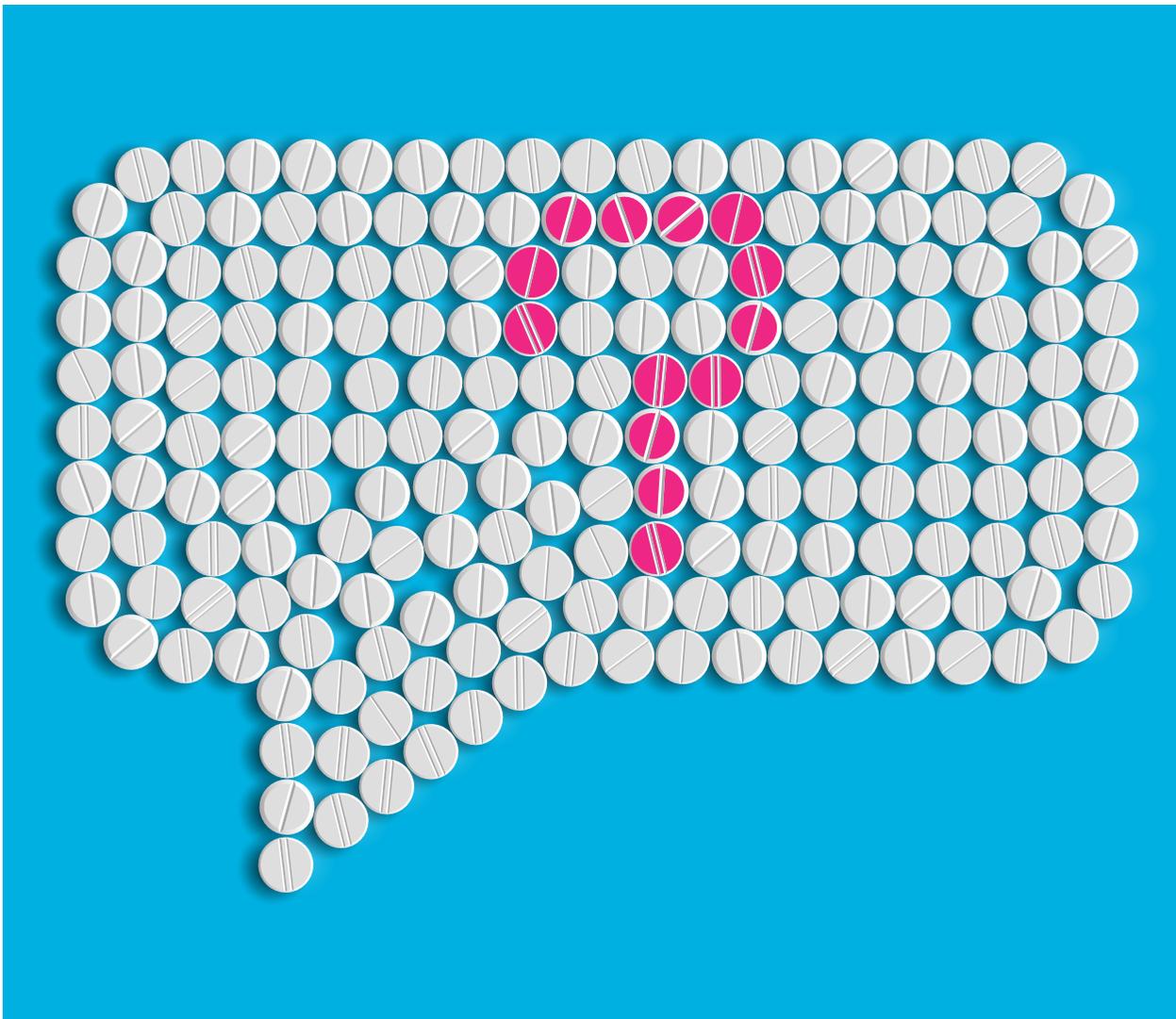
Otro error grave es suspender nuestro tratamiento antes de tiempo; el objetivo de los antibióticos es matar a las suficientes bacterias para evitar que se propaguen, lo que permite que nuestro organismo logre eliminar al resto de ellas. Entonces, cuando interrumpimos el medicamento antes de que eso pase, es probable que persista una cantidad suficiente de bacterias, y entre ellas haya algunas resistentes al antibiótico que puedan generar un nuevo ciclo de enfermedad, esta vez más difícil de tratar.

Por último, el uso de estos medicamentos en la ganadería está contribuyendo al desarrollo de bacterias resistentes, ya que en muchas ocasiones se emplean grandes cantidades de antibióticos, sin re-

gulación, para prevenir que los animales contraigan enfermedades en las condiciones poco higiénicas en las que los crían (Ahmad y Khan, 2019).

■ ■ ■ ¿Cuáles son las consecuencias?

■ La resistencia a los antibióticos no es ajena a ti o a mí, pues las personas viajan y las bacterias viajan con las personas, por lo que en todo el mundo estamos expuestas a enfermarnos por una bacteria resistente (Alós, 2015; OMS, 2017). Uno de los principales efectos es que nos podemos enfermar por más tiempo y esto provoca que se gaste mucho dinero en hospitales y medicamentos. Aún más grave es que un mayor número de personas está muriendo en el mundo por infecciones causadas por bacterias resistentes a los antibióticos. También se están comprometiendo intervenciones quirúrgicas y tratamientos de quimioterapia, lo que además implica exponer a las personas con sistemas inmunitarios debilitados, ya que los pacientes en estos casos son más propensos a sufrir infecciones por bacterias y, si enferman por



una bacteria resistente, el riesgo de morir se incrementa (Alós, 2015; CDC, 2020).

Nuestro uso inadecuado de los medicamentos está provocando que muchas enfermedades que eran fácilmente tratables se conviertan en una carga para los sistemas de salud. Un ejemplo es el tratamiento para la gonorrea, una enfermedad de transmisión sexual con alta frecuencia. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), la resistencia a los antibióticos está provocando que en muchos países el tratamiento de esta enfermedad sea muy difícil. La doctora Teodora Wi, del departamento de Reproducción Humana en la OMS, afirmó: “Cada vez que usamos una nueva clase de antibióticos para tratar la infección, la bacteria

evoluciona y se vuelve resistente”; éste es el caso también de otras enfermedades, como la neumonía y la tuberculosis.

■ **¿Cómo podemos ayudar?**

■ Existen diferentes acciones para prevenir que este problema crezca de forma acelerada como hasta ahora. La primera es evitar enfermarnos; para esto debemos tomar medidas preventivas de higiene y fortalecer nuestro sistema inmunitario por medio de la práctica de ejercicio y una alimentación adecuada. Pero si ya tenemos alguna enfermedad, lo principal es no automedicarnos: eso implica no aceptar los medicamentos que le sobraron a alguien o los que

nos recetaron a nosotros o a algún familiar en ocasiones pasadas.

Por supuesto, nunca debemos utilizar antibióticos que los profesionales de la salud no nos hayan indicado, y en caso de ser necesario para nuestro tratamiento, es importante tomarlos en los horarios y periodos que señale la receta. Por último, podemos evitar, en la medida de lo posible, el consumo de alimentos de origen animal que hayan sido saturados de antibióticos para promover su producción (OMS, 2020). Aunque es cierto que los antibióticos son útiles y necesarios, no son la solución para todo lo que nos enferma, y en algunos casos pueden llegar a ser contraproducentes.

Karla Estephanía Zarco González

Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Cuajimalpa.
estephaniazg.130897@gmail.com

Martha M. Zarco González

Universidad Autónoma del Estado de México.
martha.zarco.g@gmail.com

Zuleyma Zarco González

Universidad Autónoma del Estado de México.
zuleyma.zarco.g@gmail.com

Referencias específicas

- Ahmad, M. y A. U. Khan (2019), "Global economic impact of antibiotic resistance: a review", *Journal of Global Antimicrobial Resistance*, 19:313-316.
- Alós Cortés, J. I. (2015), "Resistencia bacteriana a los antibióticos: una crisis global", *Enfermedades infecciosas y microbiología clínica*, 33(10):692-699.
- Ben, Y. et al. (2019), "Human health risk assessment of antibiotic resistance associated with antibiotic residues in the environment: a review", *Environmental Research*, 169:483-493.
- CDC (2020), "Preguntas y respuestas sobre la resistencia a los antibióticos", *Centros para el Control y Prevención de Enfermedades*. Disponible en: <www.cdc.gov/antibiotic-use/sp/antibiotic-resistance.html>, consultado el 2 de junio de 2020.
- Forbes, B. A. (2009), *Diagnóstico microbiológico*, Madrid, Médica Panamericana.
- Lorenzo, P. et al. (2008), *Farmacología básica y clínica*, 18.ª ed., Madrid, Médica Panamericana.
- Martínez-Martínez, L. y J. Calvo (2010), "Desarrollo de las resistencias a los antibióticos: causas, consecuencias y su importancia para la salud pública", *Enfermedades Infecciosas y Microbiología Clínica*, 28:4-9.
- NIH (2011), "Causes of antimicrobial (drug) resistance", *National Institute of Allergy and Infectious Disease-National Institutes of Health*. Disponible en: <www.niaid.nih.gov/research/antimicrobial-resistance-causes>, consultado el 16 de junio de 2020.
- OMS (2017), "El aumento de la gonorrea resistente a los antibióticos hace necesarios nuevos fármacos", *Organización Mundial de la Salud*. Disponible en: <www.who.int/es/news/item/07-07-2017-antibiotic-resistant-gonorrhoea-on-the-rise-new-drugs-needed>, consultado el 20 de junio de 2020.
- OMS (2020), "Resistencia a los antibióticos", *Organización Mundial de la Salud*. Disponible en: <www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/resistencia-a-los-antibi%C3%B3ticos>, consultado el 20 de junio de 2020.

Noemí Hernández Neri, Claudia Gutiérrez Antonio y Fernando Israel Gómez Castro

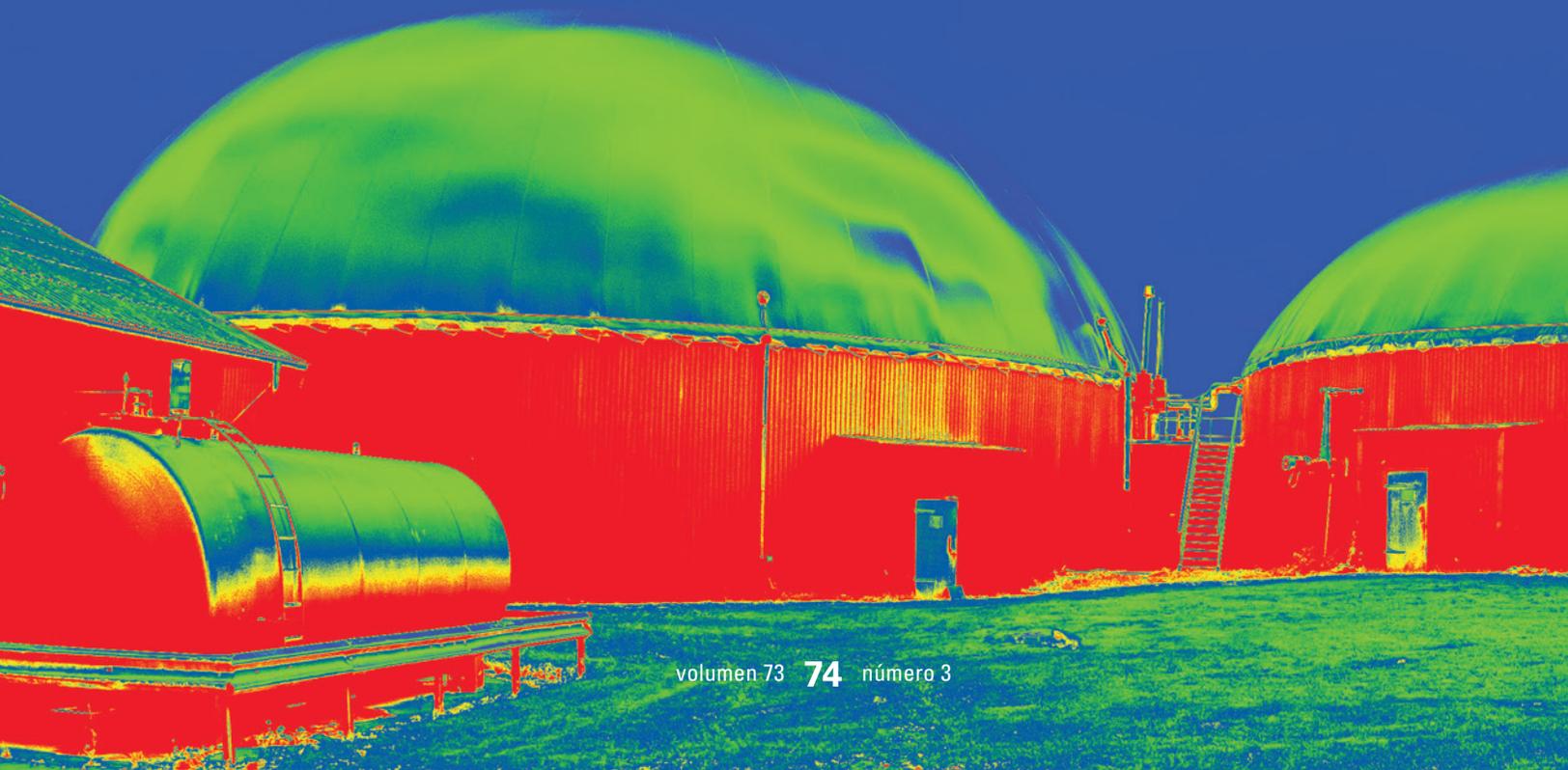
¿Todos los biocombustibles son sostenibles?

Analicemos su ciclo de vida

Los biocombustibles son una alternativa energética renovable; sin embargo, su producción genera preocupación respecto a la seguridad alimentaria, deforestación, pérdida de biodiversidad y emisiones contaminantes. Para evaluar si los biocombustibles son sostenibles se debe analizar su ciclo de vida, con lo cual se cuantifican los impactos económicos, ambientales y sociales asociados a su producción.

Introducción

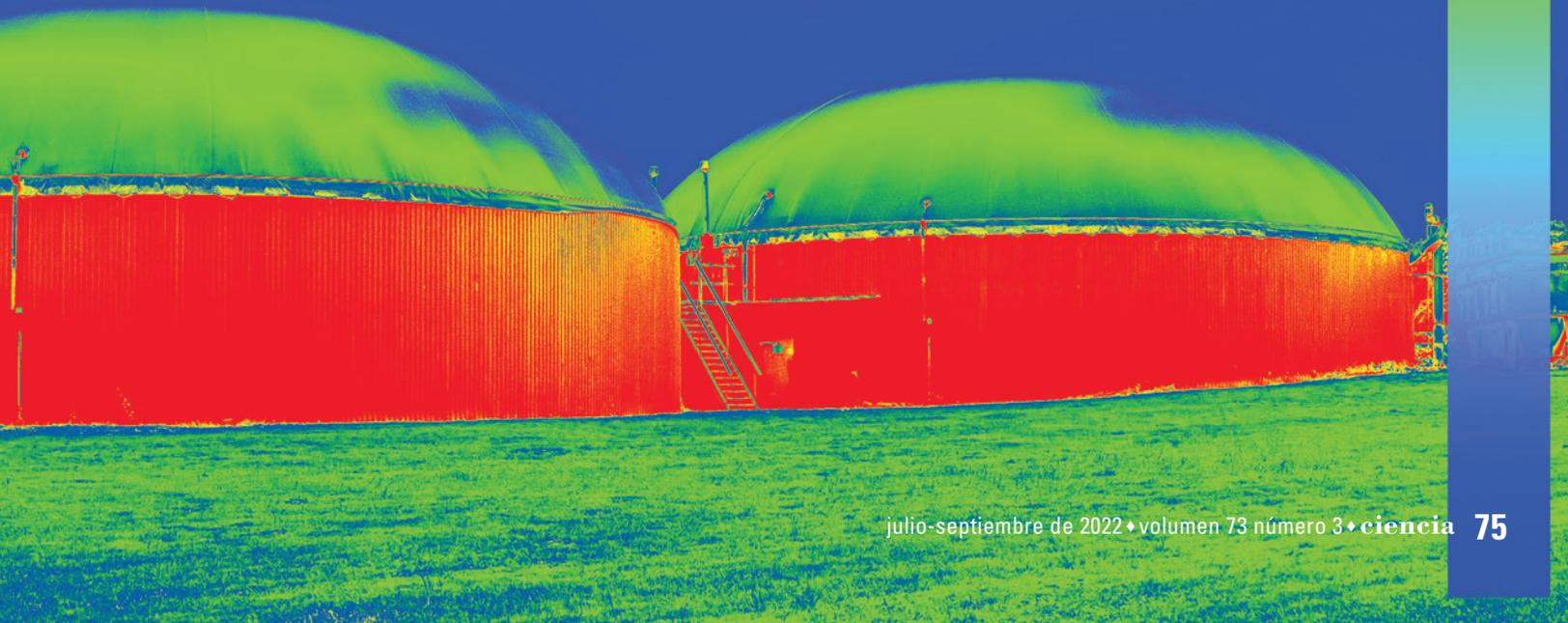
En la actualidad, los combustibles derivados del petróleo son ampliamente utilizados para la generación de energía eléctrica, calorífica, así como la requerida para los medios de transporte; todos estos tipos de energía son



necesarios en los diferentes sectores: agrícola, industrial, comercial, doméstico y transporte. Por otra parte, las estadísticas de la Organización de las Naciones Unidas indican que la población mundial se incrementará de 7 700 millones en 2019 a 9 700 millones en 2050 (ONU, 2019); por ello, se prevé que la demanda de energía aumente de forma considerable. Además, la sociedad enfrenta el problema del cambio climático, causado por el incremento de la concentración de gases de efecto invernadero (GEI), los cuales se generan por el uso de los combustibles fósiles. Por lo anteriormente expuesto, la comunidad científica se ha enfocado en buscar fuentes de energía renovables que permitan mantener el estilo de vida actual con un menor daño ambiental.

En este contexto, los biocombustibles son reconocidos como una alternativa energética promisoría y sostenible para sustituir a los combustibles fósiles. Según Ayhan Demirbas (2009), el término *biocombustible* hace referencia a los combustibles sólidos, líquidos y gaseosos derivados de fuentes renovables como la biomasa, que incluye especies cultivables comestibles (primera generación), residuos orgánicos y especies cultivables no comestibles (segunda generación), así como micro y macroalgas (tercera generación) (Gómez-Castro y cols., 2019). Los biocombustibles son considerados una opción para aumentar el uso y aprovechamiento de la biomasa, lo cual impulsará el desarrollo económico del sector rural, al mismo tiempo que contribuirá a resolver problemas relacionados con la seguridad energética y el calentamiento global.

A pesar de las ventajas de los biocombustibles, éstos también tienen efectos adversos. Por ejemplo, el cambio de uso de la tierra para el cultivo de la biomasa representa un problema, o bien las emisiones derivadas por el uso de energía convencional en la conversión de la biomasa. Por lo anterior, es importante evaluar los posibles efectos adversos sobre la salud humana o el ambiente como resultado de la producción de biocombustibles (Naik y cols., 2010). Los efectos ambientales y climáticos derivados de la producción de los biocombustibles pueden evaluarse mediante una herramienta llamada evaluación del ciclo de vida.



El objetivo del presente trabajo es describir la evaluación del ciclo de vida de los biocombustibles, identificar sus etapas de producción y analizar el impacto ambiental de dos procesos de producción de bioetanol. Al final se mencionan algunas perspectivas en torno a los factores que deben considerarse para que la producción de biocombustibles sea sostenible.

■ **Evaluación del ciclo de vida**

■ La evaluación del ciclo de vida es una herramienta útil para valorar los impactos ambientales de un producto, proceso o servicio desde el diseño hasta su disposición final, es decir, a lo largo de todo su ciclo de vida (Rathore y Singh, 2013). Por ello, la evaluación del ciclo de vida de los biocombustibles incluye todas las etapas de su cadena de producción: la generación de la biomasa, su transformación a biocombustible y la distribución a los puntos de venta y consumidores finales. No obstante, también pueden realizarse evaluaciones parciales; por ejemplo, considerando únicamente alguna de las etapas de producción o los procesos específicos de generación de la biomasa. Este último tipo de evaluaciones son valiosas cuando

se planea hacer cambios en un proceso y se desea evaluar los efectos económicos, sociales y ambientales de dichas modificaciones para determinar si generarán alguna mejora. Como parte del impacto ambiental se toma en cuenta la contribución de distintos factores de daño a la salud humana, a los ecosistemas, así como a los recursos minerales y fósiles.

La cadena de producción de los biocombustibles involucra diversas etapas, las cuales incluyen la cosecha (en caso de cultivos), recolección (cultivos y residuos), almacenamiento, transporte de biomasa, transformación de las materias primas, transporte de los biocombustibles y, por último, el uso del producto final. Todas las etapas de la cadena de producción se muestran en la Figura 1, donde también se observa que las emisiones de GEI derivadas de la quema del biocombustible son las mismas que absorben las plantas a medida que crecen; esto permite disminuir el impacto de las emisiones en el ciclo de vida completo. Asimismo, en la Figura 1 se observa que, en todas las etapas, ya sean de procesamiento o de transporte, se emplea energía convencional, lo cual implica de manera indirecta la emisión de dióxido de carbono y otros GEI.

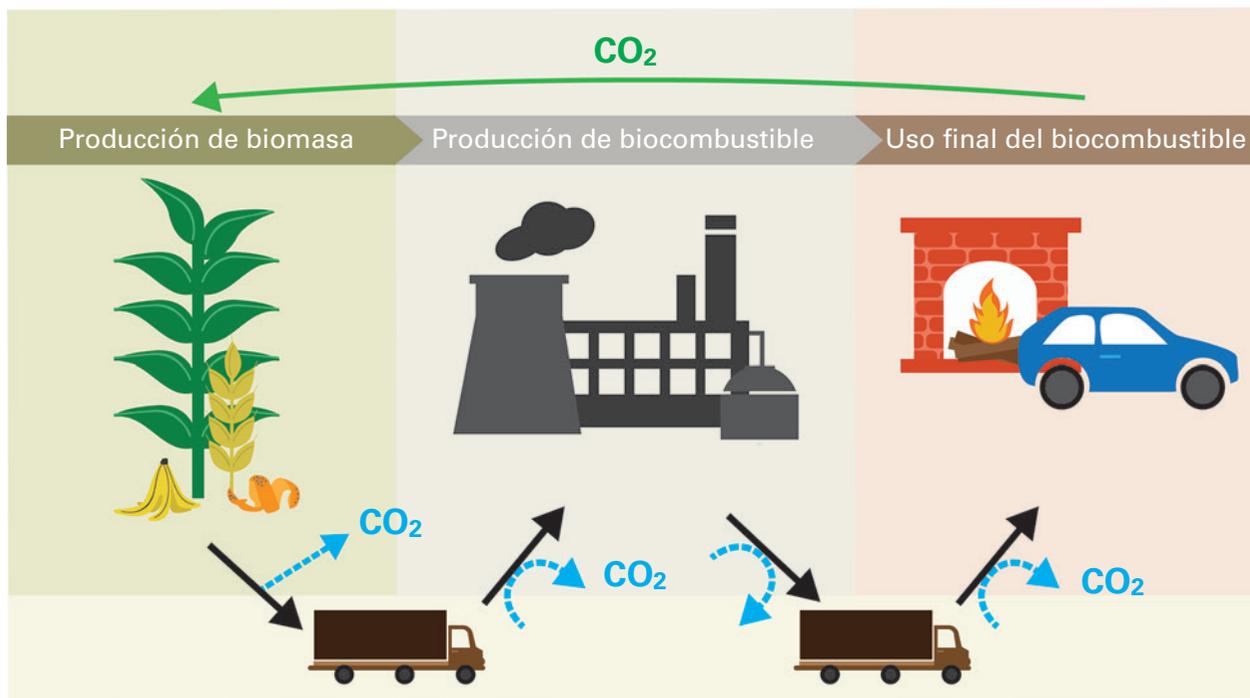


Figura 1. Etapas de la cadena de producción de los biocombustibles. Fuente: elaboración propia.

De esta forma, el impacto económico, social y ambiental depende de la materia prima, el proceso de producción y la localización tanto de los cultivos como de las plantas de procesamiento. La determinación de estos impactos permite analizar si los biocombustibles son sostenibles; es decir, se puede evaluar si estos productos pueden satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, tomando en cuenta los aspectos sociales, económicos y ecológicos (Larrouyet, 2015). Por ello, puede afirmarse que todos los biocombustibles son renovables, aunque no todos son sostenibles.

La evaluación del ciclo de vida considera impactos ambientales, económicos y sociales (véase la Figura 2), los cuales pueden ser benéficos o adversos, dependiendo de una variedad de factores. Todos estos aspectos deben considerarse para cada una de las etapas de la cadena de producción y suministro.

Producción de biomasa

La producción de biomasa tiene efectos ambientales, económicos y sociales. Con respecto a estos últimos, puede discutirse que, cuando se emplean como materias primas cultivos comestibles (por ejemplo, caña de azúcar y granos como el maíz), se genera un efecto de competencia entre la producción de biocombustibles y la de alimentos, lo que conlleva el incremento de precios de dichos cultivos. El aumento de precios tanto de manera directa (porque se limita la oferta de cereales para la alimentación) como de manera indirecta (si los alimentos son insumos de ganado, lo que influye en el precio de la carne y los lácteos) es inevitable. Por otro lado, si para la producción de biocombustibles se emplean cultivos no comestibles o residuos no hay una competencia directa con la alimentación humana; no obstante, hay efectos indirectos porque los residuos como la paja pueden ser parte de la mezcla de alimentos para el ganado y, por lo tanto, se encuentran vinculados a la cadena alimentaria. Por otra parte, algunos forrajes tienen poco valor nutricional, por lo que su uso para alimentos no es viable y en estos casos no se afecta la seguridad alimentaria.

En la evaluación de los efectos ambientales se considera el cambio o la recuperación del uso de sue-

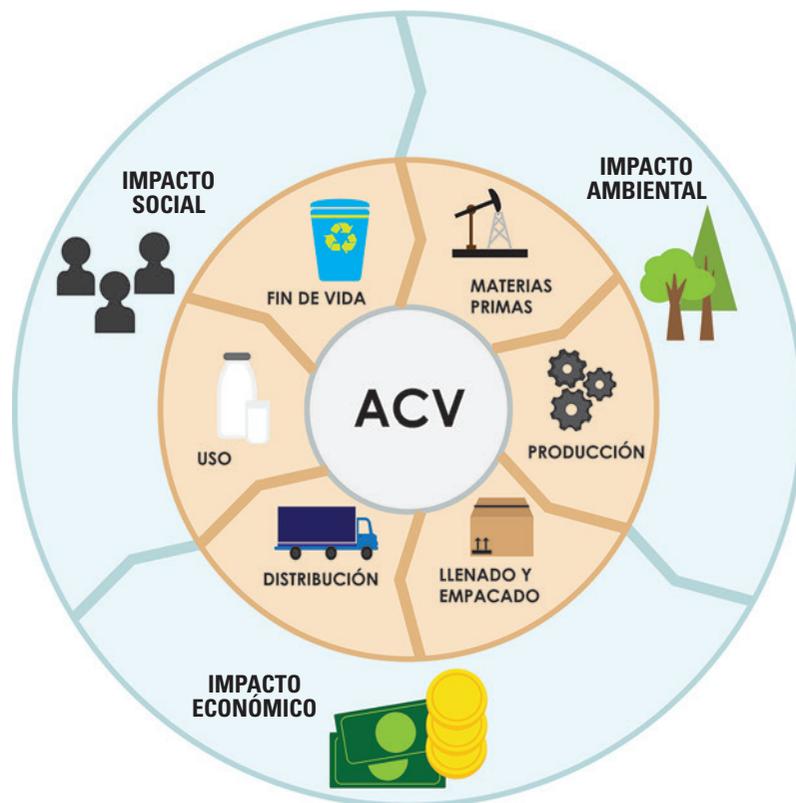


Figura 2. Tipos de impactos para evaluar la sostenibilidad. Fuente: elaboración propia.

lo, así como el empleo de agroquímicos y recursos hídricos. Para la evaluación del primer aspecto se debe considerar su aplicación actual, si la tierra es utilizada para el pastoreo o para la producción de granos destinados a la alimentación. De forma general, se considera que los biocombustibles de segunda generación tienen efectos menores por el cambio de uso del suelo, puesto que no es necesario aumentar los espacios para la producción. El aprovechamiento de residuos generados por cultivos ya existentes aumenta la eficiencia del uso de la tierra, en comparación con los biocombustibles de primera generación; por lo tanto, su impacto ambiental es mínimo en términos de obtención de la materia prima.

Por otra parte, la recuperación de terrenos abandonados o que no están siendo aprovechados es una oportunidad valiosa para la reactivación económica de las zonas rurales. Se calcula que hay alrededor de 450 millones de hectáreas de tierras de cultivo abandonadas en el mundo (Anderson y cols., 2008), por lo que una parte importante de éstas se podría

aprovechar con cultivos energéticos. Sin embargo, la producción de biocombustibles puede afectar también a la biodiversidad, debido a que se pierden hábitats naturales como resultado de la conversión de las tierras para la expansión de los cultivos. Además, la biodiversidad agrícola se ve afectada por los monocultivos a gran escala, lo cual también aumenta la vulnerabilidad ante nuevas plagas y enfermedades, al no haber rotación de cultivos.

Por otra parte, hay dos tipos de agroquímicos empleados en el suelo agrícola: fertilizantes que mejoran el crecimiento de las plantas y pesticidas que sirven para minimizar el ataque de las plagas. Estos productos agroquímicos pueden filtrarse al subsuelo y afectar de manera negativa la calidad del agua. Es importante mencionar que cada cultivo difiere en gran medida de otros en cuanto a sus necesidades de fertilizantes y plaguicidas. En el caso del aprovechamiento de los residuos este rubro no se considera.

Ahora bien, la producción de biocombustibles de primera generación incrementa de forma significativa la demanda de agua; se estima que la **huella hídrica** de los cultivos de primera generación puede incrementarse hasta diez veces en el periodo 2012-2030 (de 90 km³/año a 970 km³/año). Se espera además que la huella hídrica azul, la cual se refiere al agua dulce extraída, aumente de 0.5% a 5.5% en el periodo 2005-2030 (Gerbens-Leenes y cols., 2012). La variación de la huella hídrica de los cultivos es considerable dependiendo de las características de las especies, las condiciones de producción agrícola, el clima de la zona, así como la eficiencia del riego, ya sea por lluvia o extraído de ríos, acuíferos, etc. Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación tienen menor impacto en el uso de agua, pues se aprovecha la conversión de todo el material **lignocelulósico**. Los biocombustibles elaborados con residuos agrícolas pueden tener un menor impacto en cuanto al uso del agua; sin embargo, su procesamiento requiere mayor cantidad de agua que los cultivos de primera generación, debido a que se lleva a cabo un mayor número de operaciones de conversión y separación.

Respecto a los biocombustibles de primera y segunda generación existen oportunidades para mejo-



rar los efectos económicos a lo largo de toda la cadena productiva; en otras palabras, se pueden generar empleos desde la etapa de producción o recolección de biomasa hasta la de distribución del producto. Lo anterior se debe a que la producción de biocombustibles permite crear asociaciones entre el sector agrícola-forestal con el sector industrial, lo que beneficia a los sectores productores del campo. Se estima que la biomasa puede implicar la generación de 135 puestos de trabajo directos por cada 10 000 usuarios, frente a los 9 empleos que se crean por la obtención de petróleo o gas natural (REMBIO, 2011); esto significa que la generación de empleo es 14 veces mayor con respecto al sector de los combustibles fósiles.

Transporte de materias primas y productos

El transporte de la biomasa desde el campo hasta la planta de producción de los biocombustibles, y posteriormente el transporte del biocombustible a los puntos de venta o a sus consumidores finales, también constituye un aspecto importante para analizar la sostenibilidad de los biocombustibles. Los impactos ambientales son los de mayor peso en este eslabón de la cadena de suministro. Las distancias de transportación están relacionadas con la cantidad

Huella hídrica ▶ Cantidad de agua dulce que se emplea en la fabricación de un producto.

Lignocelulósico ▶ Material de origen orgánico que debe su nombre a los componentes lignina, celulosa y hemicelulosa.



de combustible requerido para la distribución en los distintos puntos de la cadena de suministro; a mayor distancia mayor cantidad de combustible a usar, y por lo tanto se tienen más emisiones contaminantes. Otro aspecto importante es el tipo de transporte (terrestre, acuático o aéreo), el modelo del vehículo y el tipo de combustible que se usa en cada caso, así como sus rendimientos por kilómetro recorrido. Cabe añadir que el transporte es un factor clave en la determinación de costos para los biocombustibles; así, la rapidez y eficiencia de entrega de los biocombustibles influye de manera directa en la rentabilidad de la cadena de suministro.

Producción de biocombustible

Con respecto al impacto ambiental de la producción de biocombustibles es importante recordar que ésta incluye pretratamientos, procesos de conversión y separación. Cada una de estas etapas requiere energía, así como reactivos, y pudiera o no tener emisiones y **efluentes** asociados con su operación. Por lo general, en las biomásas lignocelulósicas el pretratamiento es la etapa que mayor energía demanda, mientras que en el caso de las biomásas de triglicéridos se requiere más energía en la conversión y separación. Por

otro lado, los sistemas de biocombustibles de segunda generación requieren equipos de procesamiento más sofisticados, una mayor inversión por unidad de producción e instalaciones de mayor escala que los biocombustibles de primera generación. Entre las ventajas que tiene el uso de biocombustibles de segunda generación está la revalorización de algunos residuos agroindustriales, lo cual contribuye a resolver el problema asociado a su inapropiada disposición. Los residuos agroindustriales tienen un alto potencial para convertirse en biocombustibles y permiten diversificar las materias primas empleadas para obtenerlos. Además, los biocombustibles pueden proporcionar beneficios socioeconómicos por la instalación de plantas de procesamiento en zonas rurales; esto posibilitará generar empleos y aumentar el ingreso familiar, lo que también tiene beneficios en el ámbito social.

Uso final del biocombustible

El impacto ambiental asociado al uso de los biocombustibles es reducido, en comparación con los combustibles fósiles; las emisiones que se liberan durante la combustión del biocombustible son las mismas que las plantas absorbieron durante su crecimiento (Gómez-Castro y cols., 2019). No obstante, es importante considerar que en la cadena completa de suministro no sólo se toma en cuenta el uso del biocombustible, sino también el proceso de producción, así como el transporte de materias primas y productos; de ahí la importancia de contar con procesos de mínimo consumo energético e implementar cadenas locales de suministro. Con respecto al impacto económico, en algunos países se otorgan incentivos monetarios a las empresas que contribuyan a mejorar la calidad ambiental y que consigan regular las emisiones generadas por sus procesos productivos. El uso de biocombustibles contribuye a lograr dichos objetivos y posibilita que las compañías sean ambiental y socialmente responsables.

Evaluación del ciclo de vida del bioetanol

■ El bioetanol es el aditivo y biocombustible de mayor producción a escala mundial. El bioetanol es un

Efluentes

Corrientes de líquido o gas que se generan en los procesos y que usualmente contienen materiales contaminantes.

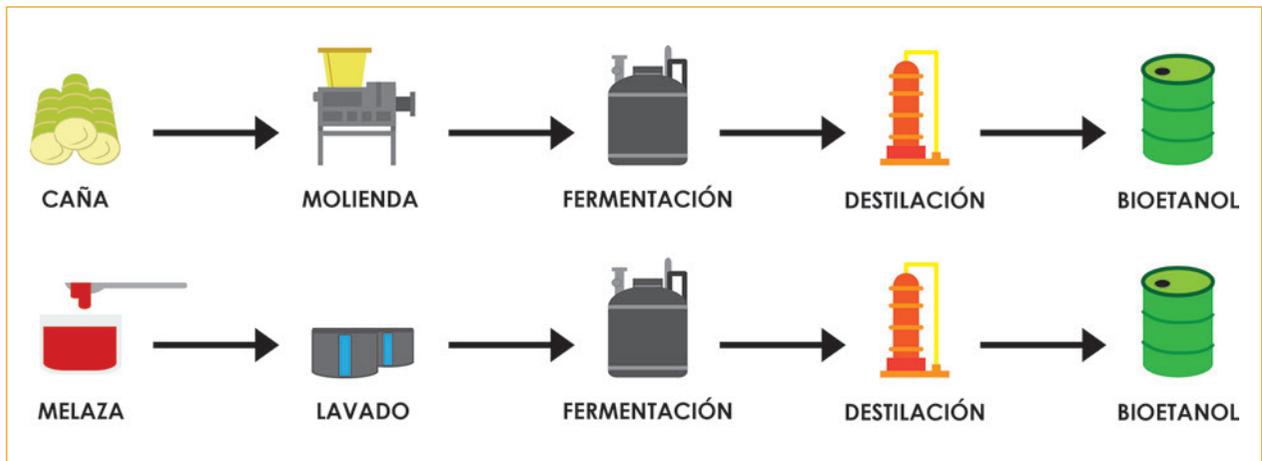


Figura 3. Proceso de producción de bioetanol a partir de: a) caña de azúcar; y b) melaza. Fuente: elaboración propia.

alcohol de origen orgánico obtenido del maíz, trigo, cebada, caña de azúcar, remolacha o alimentos ricos en almidón; en estos casos, los azúcares son convertidos en bioetanol por medio de la fermentación alcohólica. Sin embargo, el uso de estos cultivos comestibles para la producción de bioetanol implica un riesgo para la seguridad alimentaria, por lo que se ha explorado el uso de otras materias, como los residuos lignocelulósicos o las microalgas.

En 2014, Ioannis Tsiropoulos y cols. (2014) analizaron el ciclo de vida del bioetanol producido mediante fermentación a partir de caña de azúcar y melaza de caña de azúcar (véase la Figura 3). Sus resultados muestran que el etanol a partir de melaza tiene menores emisiones de GEI ($0.09\text{-}0.64 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{etanol}}$) que el producido a partir de caña de azúcar ($0.46\text{-}0.63 \text{ kg CO}_{2\text{eq}}/\text{kg}_{\text{etanol}}$); estos resultados se explican en términos de que el bioetanol es producido a partir de la melaza, un coproducto de la producción de azúcar, lo que resulta en una menor asignación de la carga ambiental total. Por otra parte, el daño a la salud humana, cuantificado en años de vida adaptados por discapacidad (DALY, por sus siglas en inglés), para el bioetanol de melaza tiene valores menores ($3.6 \times 10^{-6} \text{ DALY}/\text{kg}_{\text{etanol}}$) en comparación con el obtenido de caña ($4 \times 10^{-6} \text{ DALY}/\text{kg}_{\text{etanol}}$). Lo anterior se debe al alto uso de pesticidas en el suelo; en este caso específico, daconate (herbicida que contiene arsénico) y atrazina (herbicida), aplicados en la producción de caña de azúcar. Por último, el daño al ecosistema,

estimado en fracción de desaparición de especies (PDF, por sus siglas en inglés), es menor cuando se emplea la melaza ($2.5 \text{ PDF} \times \text{m}^2 \times \text{año}/\text{kg}_{\text{etanol}}$) que cuando se emplea la caña de azúcar ($3.3 \text{ PDF} \times \text{m}^2 \times \text{año}/\text{kg}_{\text{etanol}}$). En la producción de caña de azúcar, las categorías de impacto que contribuyen de forma significativa al daño del ecosistema son la ocupación de la tierra (debido al uso directo de jugo de caña de azúcar para la producción de etanol) y la toxicidad terrestre (asociada principalmente al deconato); a su vez, el mayor impacto en el caso del bagazo es debido a la acidificación y la nutrición terrestre por las prácticas de quema precosecha. Cabe resaltar que las mejoras en la eficiencia de la producción agrícola (riego, uso de fertilizantes, cambios de suelo, sistema de producción, entre otros) mostrarán nuevos panoramas con respecto a las emisiones generadas.

Para terminar, debemos añadir que el uso de materias primas comestibles para producir biocombustibles podría afectar la seguridad alimentaria. Adicionalmente, es importante considerar la legislación asociada al tema. En México, la Ley de Promoción y Desarrollo de los Bioenergéticos indica que la caña de azúcar y el maíz pueden usarse para producir biocombustibles, sólo en caso de existir un superávit (Gómez-Castro y cols., 2019). Sin embargo, en Estados Unidos de América y Brasil no hay una legislación similar, y estas biomásas han sido exitosamente empleadas para generar bioetanol sin afectar la seguridad alimentaria. Por ello, la selección de una bio-

masa para producir biocombustibles debe considerar tanto la legislación local como el riesgo potencial para la seguridad alimentaria global.

■ Conclusiones

■ El análisis del ciclo de vida de los biocombustibles incluye los impactos ambientales, económicos y sociales relacionados con su cadena de producción. Los resultados obtenidos de este análisis y la herramienta de evaluación del ciclo de vida son de vital importancia para el desarrollo tecnológico de los procesos de producción de biocombustibles sostenibles.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico al proyecto 279753, así como por la beca de Noemí Hernández Neri 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

Fernando Israel Gómez Castro

Universidad de Guanajuato.
fgomez@ugto.mx

Referencias específicas

- Anderson, T., H. Paul y G. Rodríguez (2008), “Los agrocombustibles y el mito de las tierras marginales”, *Polis*, 21:3-12.
- Demirbas, A., (2009), “Los biocombustibles satisfacen las necesidades futuras de energía del planeta”, *Energía, Conversión y Gestión*, 50:2239-2249.
- Gerbens-Leenes, P. W., A. Hoekstra y T. H. Van Der Meer (2012), “Biofuels scenarios in water perspective: The global blue and green water footprint of road transport in 2030”, *Global Environmental Change*, 22:764-755.
- Larrouyet, M. C. (2015), *Desarrollo sustentable: origen, evolución y su implementación para el cuidado del planeta* (trabajo final integrador), Universidad Nacional de Quilmes, Argentina.
- Naik, S. N., V. V. Goud, P. K. Rout y A. K. Dalai (2010), “Production of first and second generation biofuels: A comprehensive review”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(2):578-597.
- ONU (2020), *Perspectivas de la población mundial 2019: metodología de las Naciones Unidas para las estimaciones y proyecciones de población*, serie Población y Desarrollo 132 (LC/TS.2020/95), Santiago, CEPAL.
- Rathore, D., D. Pant y A. Singh (2013), “A comparison of life cycle assessment studies of different biofuels”, en A. Singh, D. Pant y S. I. Olsen, *Life Cycle Assessment of Renewable Energy Sources*, Londres, Springer, pp. 269-289.
- REMBIO (2011), *La bioenergía en México, situación actual y perspectivas*, cuaderno temático núm. 4, México, Red Mexicana de Bioenergía. Disponible en: <<http://rembio.org.mx/wp-content/uploads/2014/12/CT4.pdf>>, consultado el 3 de mayo de 2022.
- Tsiropoulos, I., A. P. Faaij, J. E. Seabra, L. Lundquist, U. Schenker, J. F. Briois y M. K. Patel (2014), “Life cycle assessment of sugarcane ethanol production in India in comparison to Brazil”, *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(5):1049-1067.
- Gómez-Castro, F. I., C. Gutiérrez-Antonio, S. Hernández, C. Conde-Mejía, A. López-Molina y R. Morales-Rodríguez (2019), “Producción de biocombustibles en México. Parte 2. Procesos de producción y áreas de oportunidad”, *CIENCIA@UAQro*, 12(2): 51-60.

Desde la UAM
De actualidad
Noticias de la AMC



Mario de Leo Winkler, coordinador

Investigación vanguardista para la preservación ambiental

En el presente escrito hacemos del conocimiento de la ciudadanía cinco diferentes proyectos de investigación de vanguardia e interdisciplinaria, llevados a cabo en las unidades académicas de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) desde diferentes campos del conocimiento, para contribuir al cuidado del ambiente, además de incidir o tener gran potencial de lograr un contundente impacto social.

Circularidad de residuos plásticos en México

Los residuos plásticos constituyen uno de los grandes problemas en la agenda ambiental global y nacional. De acuerdo con el *Diagnóstico básico para la gestión integral de los residuos* (Semarnat, 2020), en México se generan al día más de 15 000 toneladas de desechos plásticos, que en su mayoría van a parar a los sitios de disposición. Sin embargo, debido a malas prácticas de manejo, una proporción significativa llega al medio natural.

En contraste, la economía circular permite tener una visión diferente de los plásticos: no sólo como un problema ambiental, sino como un recurso valioso que, si se emplea de forma racional, puede contribuir a un aprovechamiento sustentable y a la mejora de las condiciones de vida de las personas (véase la Figura 1). El Área de Investigación de Tecnologías Sustentables de la UAM Azcapotzalco ha contribuido al análisis de la circularidad de los plásticos en México mediante el trabajo de Alethia Vázquez, Margarita Beltrán, Rosa María Espinosa, Maribel Velasco y Juan Carlos Álvarez.

Si bien la economía circular plantea distintas estrategias para mantener el valor de los materiales dentro de los sistemas de producción y consumo, la investigación realizada en la UAM Azcapotzalco muestra que en México la estrategia de circularidad que ha sido promovida en mayor medida es el reciclaje. El acopio, acondicionamiento y transformación de la materia prima es una realidad para distintos residuos plásticos provenientes de actividades productivas, de comercialización y de consumo, como los envases rígidos y la **película termoencogible** empleada en el

Película termoencogible

Plástico que se encoge al ser sometido a una fuente de calor y se usa en el embalaje de productos para su transporte o comercialización.

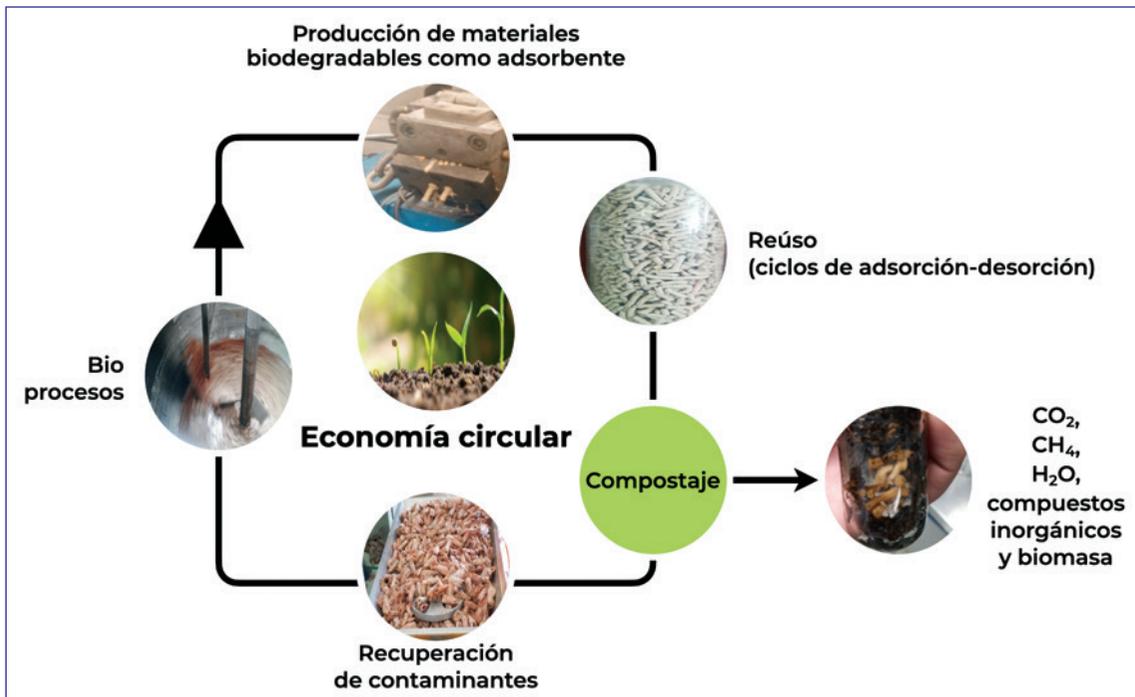


Figura 1. Proceso de economía circular. Fuente: Keiko Shirai.

Procesos enzimáticos
 Conjunto de las fases sucesivas de una operación realizada mediante proteínas que catalizan (aceleran) específicamente una reacción química.

embalaje. Sin embargo, se encontró que no se cuenta con información sistemática sobre el volumen de los materiales reciclados, en gran medida porque la cadena de valorización incluye un componente muy significativo de actividades informales.

A pesar de que existen avances en la práctica del reciclaje, es indispensable promover estrategias de circularidad que apunten a la prevención, como la reutilización, reparación y remanufactura. También consideramos necesario que los programas a desarrollar incluyan medidas que permitan involucrar al sector informal, de modo que el aprovechamiento de los recursos no se dé en detrimento del bienestar social de los sectores marginados. Esta visión amplia e integral de la economía circular llevará a un uso racional de estos materiales, indispensables en el mundo actual.

Biopolímeros y materiales biodegradables

La producción biotecnológica del biopolímero biodegradable denominado quitina, desarrollada por Keiko Shirai en la UAM Iztapalapa, es una alternativa a la disposición de residuos de la industria de alimentos. Esta solución es de fácil manejo, sim-

plicidad, rapidez (mediante **procesos enzimáticos**), control, baja inversión de energía (a temperatura ambiente), poco consumo de agua y de disolventes; además, reduce el impacto ambiental y los costos.

Los biopolímeros son producidos a partir de fuentes naturales, bien sea sintetizados vía química o biológica, los cuales pueden ser biodegradables. En México y el resto del mundo, el interés en la aplicación de estos biopolímeros es alentado por la contaminación ambiental generada por polímeros no biodegradables derivados del petróleo (véase la Figura 2). La economía circular busca mantener estos productos, componentes y materiales en uso durante más tiempo (Ghisellini y cols., 2016).

Mediante la bioconversión de fuentes renovables, como parte de una estrategia circular, la producción de biopolímeros transformados a materiales biodegradables ofrece una amplia diversidad de usos, como envases y recubrimientos para la conservación y el almacenamiento de alimentos, para textiles, como vehículos para la liberación controlada de fármacos, en andamios celulares para ingeniería de tejidos, así como adsorbentes para la remoción de metales pesados y otros contaminantes persistentes en el agua. Los conocimientos acerca de la síntesis de biopolí-



Figura 2. Uso de plásticos en México. Fuente: Alethia Vázquez Morillas.

meros y su procesamiento a materiales biodegradables son de gran relevancia, ya que cada vez más permitirán implementar medidas que tendrán un impacto directo en la comercialización de los materiales contaminantes para beneficio del ambiente y de la sociedad.

■ Manejo forestal comunitario: alternativa para almacenar carbono

■ El equipo de investigación del Departamento de Producción Agrícola y Animal de la UAM Xochimilco, integrado por Mariela Fuentes Ponce, Fernando de León González, Melquiades Cortés Pérez y Tania Leyva Pablo, en colaboración con un equipo del Colegio de Postgraduados, campus Montecillos,

en el que participan Fernando Paz Pellat y Jorge Etchevers Barra, así como con un grupo de investigadores de la Universidad de la Sierra de Juárez y la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio), integrado por Wenceslao Santiago García y Alejandro Ponce Mendoza, han trabajado con organizaciones campesinas como La Unión de Comunidades Productoras Forestales Zapotecas-Chinantecas (UZACHI). Como resultado de este trabajo se ha logrado la conservación de bosques de pino y encino, así como del muy singular bosque mesófilo en la Sierra Norte de Oaxaca (véase la Figura 3).

El modelo dominante de vida contemporánea ha traído efectos negativos para el ambiente, como los cambios bruscos en los eventos climáticos. Ante esta



Figura 3. Bosques de la Sierra de Oaxaca. Fuente: Mariela Fuentes.

realidad, es primordial promover la conservación y el uso racional de bosques y selvas, ya que son ecosistemas reguladores del clima, el ciclo del agua, la conservación del suelo y uno de los reservorios de carbono más grandes e importantes del planeta, lo que está ligado a la reducción del dióxido de carbono en la atmósfera. Asimismo, tienen un considerable valor económico cuando son bien aprovechados.

En México se han conservado extensas superficies forestales gracias al trabajo de las comunidades rurales, muchas de ellas indígenas, encargadas del aprovechamiento del bosque. La organización campesina UZACHI cuenta con dos variantes: un manejo forestal con un objetivo comercial que se traduce en ingresos económicos de uso social (forestería de alta intensidad) y otro de baja intensidad, más orientado a la conservación del bosque. Así, en los bosques de alta intensidad encontramos alrededor de 18 especies de árboles, mientras que en los de baja, 30.

Con base en los resultados obtenidos, la mayor diversidad de especies arbóreas significó un aumento del carbono (383.9 Megagramos de carbono por hectárea [Mg C ha⁻¹]), algo muy similar a un bosque sin manejo forestal, y también se presentó el mayor contenido de carbono en el suelo y la hojarasca (127.89 Mg C ha⁻¹) debido al manejo comunitario que favorece la permanencia de los residuos de biomasa en el terreno y fomenta la conservación de los suelos. El manejo comunitario es una alternativa ecológicamente viable para la Sierra de Oaxaca y otras regiones de México desde el punto de vista de su capacidad para almacenar carbono, además de que implica una ganancia económica. El balance financiero demostró que el método intensivo resulta más rentable debido a los periodos de tala más frecuentes, por lo que se deben gestionar incentivos financieros para las comunidades que se orienten hacia la conservación del bosque.

Captura de gases de efecto invernadero

Ante la crisis actual de cambio climático, ocasionado por la acumulación de gases de efecto invernadero en la atmósfera, en el Laboratorio de Bioprocesos de la UAM Cuajimalpa se explora el uso de

microorganismos para la captura de metano y dióxido de carbono, principales compuestos que juntos representan más del 90% del total de emisiones. La investigación desarrollada por Patricia Ruiz Ruiz, Marcia Morales y Sergio Revah, del Departamento de Procesos y Tecnología de la UAM Cuajimalpa, busca cómo capturar estos gases mediante cocultivos de metanótrofos y microalgas.

Los metanótrofos son bacterias que crecen consumiendo metano como única fuente de carbono y energía; lo convierten y desechan como biomasa, agua y dióxido de carbono. Las microalgas, a su vez, son un grupo diverso de microorganismos fotosintéticos que convierten este gas en biomasa. La idea de cultivar juntos a estos organismos es para crear una sinergia, en la que el dióxido de carbono generado por los metanótrofos sea consumido por las microalgas, y que éstas, mediante la fotosíntesis, generen el oxígeno requerido por los metanótrofos para continuar oxidando el metano.

Este estudio explora la biodiversidad y ha evaluado combinaciones de diferentes microorganismos, por ejemplo, un consorcio metanotrófico proveniente del antiguo lago de Texcoco, el cual crece en condiciones alcalinas (pH > 9), en combinación con una microalga aislada de Cuatro Ciénegas, Coahuila. También se estudian cepas puras y otros consorcios que crecen en condiciones neutras de pH, además de otros en extrema acidez, y se exploran varias configuraciones de **biorreactores**. Los resultados hasta ahora demuestran el secuestro exitoso y simultáneo de estos dos gases de efecto invernadero (véase la Figura 4), con casi nulas emisiones de carbono y la generación de biomasa en cocultivo con valor como proteína unicelular (alimento), pigmentos, biocombustibles, bioplásticos y biofertilizantes, entre otros usos.

Membranas de óxido de grafeno para mejorar la calidad del agua

Tener agua de calidad adecuada y en cantidad suficiente para el consumo humano es una condición indispensable, pero únicamente 3% del agua en nuestro planeta es dulce. El crecimiento de la pobla-

Biorreactor
Recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo para facilitar el crecimiento de la biomasa por transformación o degradación de la materia orgánica.

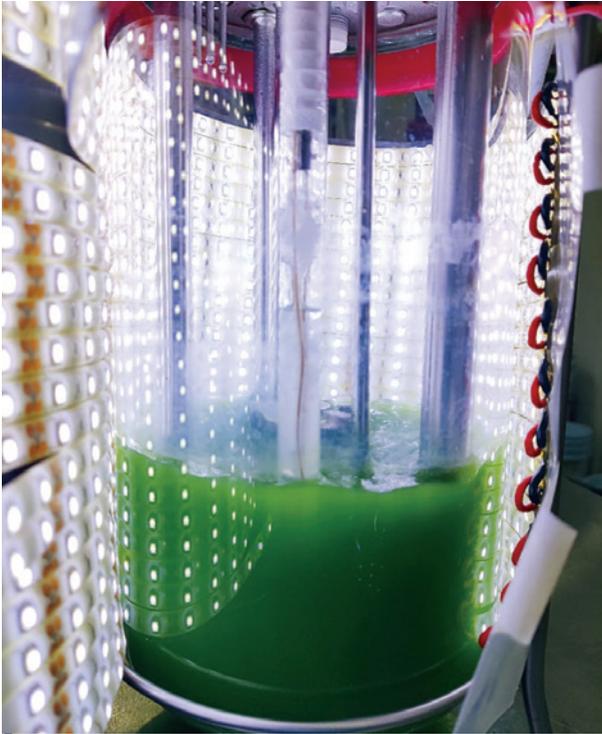


Figura 4. Captura de gases de efecto invernadero. Fuente: Sergio Revah.

ción, la urbanización e industrialización, así como el consumo de agua en actividades agropecuarias, han incrementado la escasez en muchas regiones. Ante un escenario de cambio climático, este problema se agravará en el corto plazo.

Lo anterior hace necesario eliminar aquellos contaminantes que ingresan al agua debido a las actividades humanas. Los procesos naturales pueden lidiar con algunos de éstos; sin embargo, hay otros componentes que sólo son removidos por procesos especiales que, por lo general, requieren un elevado costo de inversión y de operación, lo que ha frenado su implementación. Tal es el caso de la filtración.

En la filtración, una corriente de agua se hace pasar por un filtro o membrana que retiene los componentes que tienen mayor tamaño que los poros del material que constituye el filtro; por ello, en estas tecnologías se habla de microfiltración (retiene especies como microorganismos, **coloides**, etc.), ultrafiltración (retiene proteínas y macromoléculas) y nanofiltración (retiene especies del orden de nanómetros, como azúcares y sales polivalentes, entre otros). Dado que se requiere una diferencia de presión para hacer pasar la corriente de agua a través

de la membrana, conforme menor es el tamaño de los poros se requiere mayor presión; es decir, energía. Además, los poros se van obstruyendo con el uso, lo que ocasiona un mayor consumo energético y, finalmente, requiere el cambio de la membrana.

El investigador Yuri Reyes, de la UAM Lerma, trabaja con un material que recientemente ha llamado la atención para la generación de membranas de alto desempeño con fines de potabilización de agua: el grafeno y sus derivados, como el óxido de grafeno. El grafeno está compuesto únicamente por átomos de carbono organizados en un arreglo hexagonal; es una “hoja” con espesor de un átomo, funciona como excelente conductor del calor y la electricidad y, además, es impermeable y presenta propiedades mecánicas extraordinarias.

No obstante, el grafeno tiene carácter hidrofóbico; es decir, no se moja con el agua. Cuando una hoja de grafeno tiene átomos de oxígeno, se convierte en óxido de grafeno, y entonces sus propiedades se pueden ajustar según la cantidad de oxígeno, pues se vuelve hidrofílico (se puede mojar) y puede reaccionar para modificar su comportamiento. Las membranas de óxido de grafeno tienen huecos de tamaño nanométrico y pueden eliminar moléculas contaminantes por micro o ultrafiltración.

Además, hay otros mecanismos; por ejemplo, los grupos con oxígeno se cargan negativamente, por lo que los iones metálicos con cargas positivas pueden ser retenidos por interacción electrostática, lo que se usa para retener iones de plomo, mercurio y otros metales potencialmente tóxicos. También las regiones hidrófobas del óxido de grafeno tienen afinidad por las moléculas no polares, como las grasas, aceites y algunos fármacos, lo que hace que se queden retenidas en la membrana. Asimismo, se puede ajustar el espacio entre las hojas que forman la membrana, lo que da lugar a membranas selectivas por tamaño molecular que han mostrado tener buena permeabilidad al agua; es decir, se aumenta la cantidad de agua filtrada con el mismo consumo energético que tienen otras membranas similares.

Aunque la tecnología de membranas ya es conocida y usada para potabilizar el agua, es necesario desarrollar membranas que funcionen con varios

Coloides

Sistemas en los que una fase sólida o líquida se presenta en partículas que tienen tamaños del orden de micrómetros y se dispersan en otra fase; a simple vista parecería una mezcla homogénea, pero a menor escala se observan las micropartículas.

mecanismos simultáneamente para retener iones y moléculas de contaminantes que no pueden eliminarse por otros procesos. Adicionalmente, es necesario que sean sencillas de producir, que requieran un bajo consumo energético durante su uso y que tengan un tiempo de vida útil adecuado. En pruebas de laboratorio las membranas de óxido de grafeno cumplen con estas funciones, pero hace falta desarrollar rutas eficientes para la obtención del óxido de grafeno que permitan tener membranas que sean competitivas en el mercado respecto a sus propiedades y por su costo.

Alethia Vázquez Morillas

Departamento de Energía, UAM Azcapotzalco.
alethia@azc.uam.mx

Concepción Keiko Shirai Matsumoto

Departamento de Biotecnología, UAM Iztapalapa.
smk@xanum.uam.mx

Mariela H. Fuentes Ponce

Departamento de Producción Agrícola y Animal, UAM Xochimilco.
mfponce@correo.xoc.uam.mx

Sergio Revah Moiseev

Departamento de Procesos y Tecnología, UAM Cuajimalpa.
srevah@correo.uam.mx

Yuri Reyes Mercado

Departamento de Recursos de la Tierra, UAM Lerma.
y.reyes@correo.ler.uam.mx

Mario de Leo Winkler

Departamento de Comunicación del Conocimiento, Rectoría General de la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM).
madeleowinkler@correo.uam.mx

Lecturas recomendadas

- Cortés-Pérez, M., F. de León-González, F. Paz-Pellat, T. Leyva-Pablo, W. Santiago-García, A. Ponce-Mendoza y M. H. Fuentes-Ponce (2021), “Almacenamiento de carbono aéreo en un bosque templado de Oaxaca: manejo de alta y baja intensidad”, *Madera y Bosques*, 27:4.
- Ghisellini, P., C. Cialani y S. Ulgiati (2016), “A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems”, *Journal of Cleaner Production*, 114:11-32.
- Leyva-Pablo, T., F. de León-González, J. D. Etchevers-Barra, M. Cortés-Pérez, W. Santiago-García, A. Ponce Mendoza y M. H. Fuentes-Ponce (2021), “Almacenamiento de carbono en bosques con manejo forestal comunitario”, *Madera y Bosques*, 27:1.

La sección “Circularidad de residuos plásticos en México” fue escrita por Alethia Vázquez Morillas; “Biopolímeros y materiales biodegradables”; por Concepción Keiko Shirai Matsumoto; “Manejo forestal comunitario: alternativa para almacenar carbono” fue escrita por Mariela H. Fuentes Ponce; “Captura de gases de efecto invernadero”; por Sergio Revah Moiseev; “Membranas de óxido de grafeno para mejorar la calidad del agua” fue escrita por Yuri Reyes Mercado. El artículo fue coordinado por Mario de Leo Winkler.

Martha Angélica Ramírez Salazar, Felipe de Jesús Barrios Isunza y Omar Alejandro Guirette Barbosa



La **COVID-19** y su impacto en la **industria manufacturera,** maquiladora y de servicios de exportación

Para conocer el impacto económico de la COVID-19 en la industria manufacturera, maquiladora y de servicios de exportación, analizamos una serie de indicadores públicos referentes a 2020. El año inició con valores negativos, mismos que se agravaron con el distanciamiento social; a partir de junio, de manera paulatina tuvieron una recuperación, aunque no lo suficiente para igualar las cifras de 2019.

Antecedentes

Las industrias maquiladoras de nuestro país tienen sus antecedentes en 1965; en ese entonces, surgieron como respuesta a la culminación del Programa Bracero entre México y Estados Unidos de América, lo que significó el retorno de 200 000 trabajadores al territorio mexicano (Gómez, 2004). Este programa de la industria maquiladora constituyó un esquema que benefició a ambos países, ya que al trasladar parte del proceso productivo permitió mantener una competitividad y rentabilidad global para Estados Unidos de América, aprovechando la cercanía geográfica, las ventajas de contar con abundante mano de obra barata y los estímulos fiscales otorgados por el gobierno. En tanto, para México significó una mayor inversión extranjera directa, crecimiento económico, generación de empleo y un mejor ingreso para la población de la frontera norte (Martínez, 2018).

Tras un impulso en la década de 1970 y después de integrar a las maquiladoras en diversos programas gubernamentales, el 1 de noviembre de 2006 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la reforma al Decreto para el Fomento de la Industria Manufacturera, Maquiladora y de Servicios de Exportación (Decreto IMMEX), que constituyó para México una fuente primordial de regulación para el comercio exterior, el cual representa más de 85% de las exportaciones no petroleras del país (Silva, 2019). Las empresas en este rubro se dividen en establecimientos manufactureros y no manufactureros; estos últimos llevan a cabo

actividades relativas a la agricultura, la pesca, el comercio y los servicios.

Atendiendo a su decreto de creación, el Programa IMMEX es un instrumento que permite importar temporalmente los bienes necesarios para ser utilizados en un proceso industrial o de servicio, destinado a la elaboración, transformación o reparación de mercancías de procedencia extranjera, para su exportación o la prestación de servicios de exportación, sin cubrir el pago del impuesto general de importación, del impuesto al valor agregado y, en su caso, de las cuotas compensatorias. Para poder inscribirse en el Programa IMMEX, las empresas deben registrar ventas al exterior por un valor superior a \$500 000 dólares estadounidenses al año, su equivalente en moneda nacional, o bien, en su defecto, que cuando menos 10% de su facturación total sea de exportación.

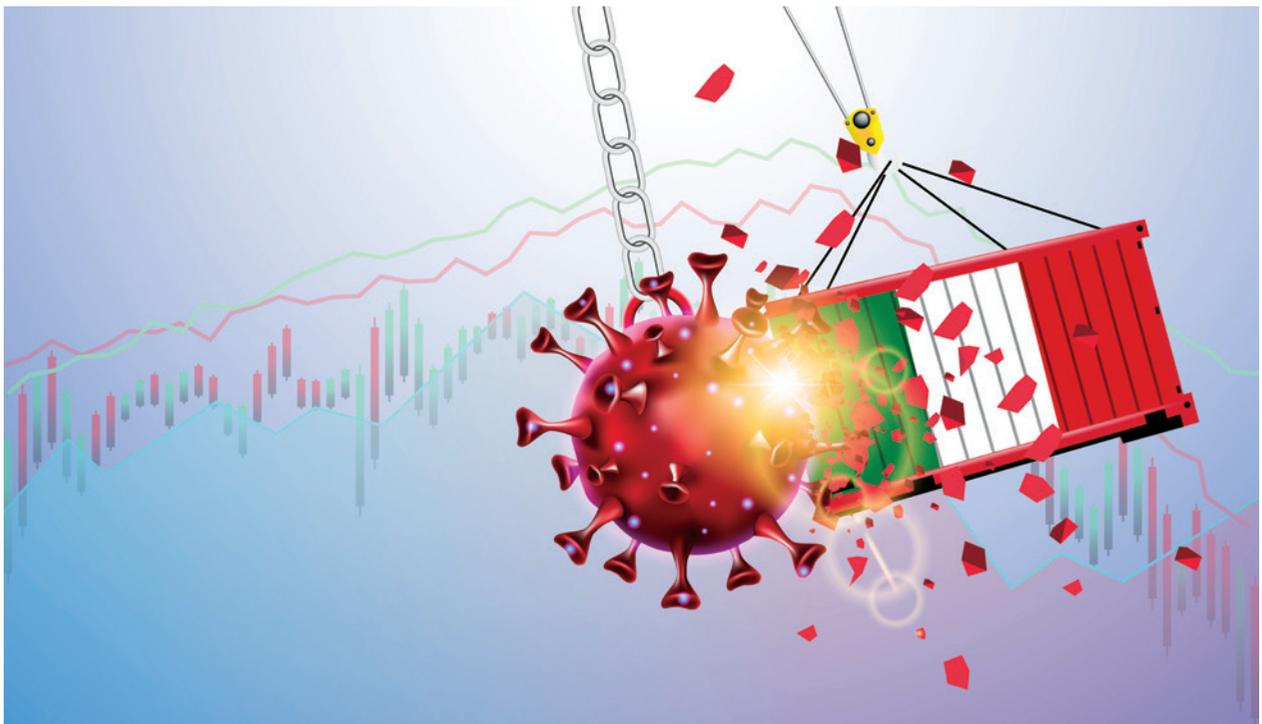
Impacto de la COVID-19

El 11 de marzo de 2020 la Organización Mundial de la Salud calificó como pandemia a la enfermedad COVID-19, causada por el nuevo coronavirus SARS-CoV-2. Como respuesta, el gobierno mexicano esta-

bleció medidas preventivas que los sectores productivos, del ámbito público, privado y social, debieron poner en práctica. Muchas empresas sufrieron un cierre temporal o tuvieron que suspender las actividades que involucran concentración de personas, tránsito o desplazamiento. De esta manera, los programas federales y locales implementados, como la Jornada Nacional de Sana Distancia (del 23 de marzo al 30 de mayo de 2020), o las suspensiones de actividades económicas no esenciales afectaron a la industria manufacturera, maquiladora y de servicios de exportación.

Por lo anterior, resulta importante conocer el impacto económico de la COVID-19 en las empresas de este sector en México durante 2020. Para este análisis tomamos en cuenta la estadística mensual del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi) respecto a las empresas inscritas en el Programa IMMEX, que muestra las principales características y evolución de los establecimientos manufactureros y no manufactureros registrados. Para determinar el impacto económico tomamos en cuenta los indicadores de personal ocupado, horas trabajadas y remuneraciones, a partir de las series calculadas por **métodos econométricos** con base en la estadística

Métodos econométricos
Representación simplificada entre variables que permite hacer estimaciones empíricas.



del Programa IMMEX del Inegi. El año que se analizó fue 2020, con énfasis a partir de la suspensión de las actividades no esenciales el 23 de marzo.

Personal ocupado

Las empresas del Programa IMMEX son una fuente importante de empleo formal; sin embargo, en 2020 se inició con un descenso en el personal ocupado de las empresas IMMEX, tanto en los establecimientos manufactureros como en los no manufactureros, situación que se agravó con la COVID-19. La Tabla 1 refleja la suma del personal dependiente de la razón social y del personal suministrado por otra razón social.

Los indicadores mensuales muestran que enero presentó una disminución de (-) 0.3% respecto al mes precedente; febrero continuó con números negativos: (-) 0.2%; en marzo, cuando comenzó el periodo de suspensión de actividades, también se registró un descenso de (-) 0.2%. En los dos meses siguientes, durante la Jornada Nacional de Sana Distancia, siguió decreciendo el personal ocupado: en abril (-) 2.0% y mayo (-) 1.8%. A partir de junio, cuando se transitó hacia la “nueva normalidad”, y durante el resto del año, se observa una recuperación gradual del empleo: junio (0.4%), julio (1.7%), agosto (0.4%), septiembre (0.8%), octubre (0.5%), noviembre (0.5%) y diciembre (0.4%).

Tabla 1. Series desestacionalizadas del personal ocupado en establecimientos inscritos al Programa IMMEX (variación porcentual)

Periodo 2020	Total	Establecimientos	
		Manufactureros	No manufactureros
Enero	(-) 0.3%	(-) 0.3%	(-) 0.7%
Febrero	(-) 0.2%	(-) 0.2%	(-) 0.1%
Marzo	(-) 0.2%	(-) 0.4%	(-) 0.1%
Abril	(-) 2.0%	(-) 2.0%	(-) 0.1%
Mayo	(-) 1.8%	(-) 2.0%	0.5%
Junio	0.4%	0.2%	0.6%
Julio	1.7%	1.8%	(-) 0.3%
Agosto	0.4%	0.8%	(-) 0.4%
Septiembre	0.8%	0.8%	0.2%
Octubre	0.5%	0.6%	0.0%
Noviembre	0.5%	0.5%	0.7%
Diciembre	0.4%	0.5%	(-) 0.6%

Fuente: series calculadas por métodos econométricos a partir de la Estadística del Programa IMMEX, con datos de Inegi (2021).

Horas trabajadas

El número de horas trabajadas es una variable que se refiere al salario del personal empleado e incluye el total de horas normales y extraordinarias efectivamente laboradas. Al igual que con el indicador del personal ocupado, enero de 2020 comenzó con una disminución de (-) 1.1%, hubo un ligero ascenso en febrero (0.5%), pero los siguientes dos meses, que forman parte de la suspensión nacional de labores, muestran una reducción: marzo (-) 0.2% y abril (-) 32.3%. A partir de mayo y lo que resta del año se presenta un aumento: mayo (10.6%), junio (25.7%), julio (4.9%), agosto (0.5%), septiembre (0.7%), octubre (0.9%) y diciembre (0.5%), con excepción de noviembre, que volvió a presentar un decremento de (-) 0.3% (véase la Tabla 2).

Remuneraciones

En la Tabla 3 se aprecian las variaciones de las remuneraciones respecto al mes anterior. Este indicador incluye los pagos y las aportaciones, normales y extraordinarias, en dinero y en especie, para retribuir el trabajo del personal de las empresas inscritas en el Programa IMMEX. Se observa que 2020 inició con un descenso de (-) 1.1%; además, los meses de la Jornada Nacional de Sana Distancia también presentaron números negativos: marzo (-) 0.6%, abril (-) 4.0% y

Tabla 2. Series desestacionalizadas de las horas trabajadas en establecimientos registrados en el Programa IMMEX (variación porcentual)

Periodo 2020	Total	Establecimientos	
		Manufactureros	No manufactureros
Enero	(-) 1.1%	(-) 1.1%	(-) 1.4%
Febrero	1.1%	1.3%	(-) 0.6%
Marzo	(-) 2.5%	(-) 2.9%	(-) 0.1%
Abril	(-) 32.2%	(-) 35.8%	(-) 4.9%
Mayo	10.6%	11.8%	4.7%
Junio	25.7%	30.1%	1.7%
Julio	4.9%	5.7%	(-) 0.5%
Agosto	0.5%	0.7%	(-) 0.5%
Septiembre	0.7%	0.8%	(-) 0.4%
Octubre	0.9%	0.9%	0.8%
Noviembre	(-) 0.3%	(-) 0.2%	(-) 0.8%
Diciembre	0.5%	0.7%	(-) 0.9%

Fuente: series calculadas por métodos econométricos a partir de la Estadística del Programa IMMEX, con datos de Inegi (2021).

Desestacionalizadas

Series consideradas homogéneas que se obtienen tras corregir el efecto de las fluctuaciones periódicas.

Tabla 3. Series desestacionalizadas de remuneraciones en establecimientos del Programa IMMEX (variación porcentual)

Periodo 2020	Total	Establecimientos	
		Manufactureros	No manufactureros
Enero	(-) 1.1%	(-) 1.1%	(-) 2.3%
Febrero	0.7%	(-) 0.7%	0.7%
Marzo	(-) 0.6%	(-) 0.6%	0.0%
Abril	(-) 4.0%	(-) 4.4%	(-) 0.9%
Mayo	(-) 0.1%	(-) 0.2%	0.1%
Junio	2.5%	3.4%	(-) 3.6%
Julio	2.6%	2.7%	1.5%
Agosto	(-) 0.1%	(-) 0.2%	1.4%
Septiembre	0.7%	0.6%	0.5%
Octubre	1.2%	1.3%	1.0%
Noviembre	0.2%	(-) 0.1%	2.2%
Diciembre	1.8%	2.2%	(-) 1.0%

Fuente: series calculadas por métodos econométricos a partir de la Estadística del Programa IMMEX, con datos de Inegi (2021).

mayo (-) 0.1%. Agosto tiene un decremento de (-) 0.1% y los demás meses reflejan números positivos: febrero (0.7%), junio (2.5%), julio (2.6%), septiembre (0.7%), octubre (1.2%), noviembre (0.2%) y diciembre (1.8%).

Variación porcentual respecto a 2019

Una vez que concluyó la Jornada Nacional de Sana Distancia, el 30 de mayo de 2020, y con el tránsito hacia la “nueva normalidad”, se manifestó una recuperación en las empresas del Programa IMMEX, con base en los indicadores de personal ocupado, horas trabajadas y remuneración. No obstante, en comparación con el año anterior, se puede advertir que la variación porcentual es negativa. El indicador de personal ocupado en 2020 presenta una diferencia de (-) 0.2%, las horas trabajadas se redujeron (-) 1.0% y las remuneraciones también disminuyeron (-) 1.0 por ciento.

Consideraciones finales

Uno de los principales esfuerzos de fomento al comercio exterior en México es el Programa IMMEX, el cual ha impulsado la generación de empleos y el incremento de la inversión extranjera directa. Sin

Tabla 4. Series desestacionalizadas de los indicadores en establecimientos inscritos al Programa IMMEX (variación porcentual)

Periodo	Personal ocupado	Horas trabajadas	Remuneraciones*
2019			
Enero	0.4%	0.9%	0.9%
Febrero	0.3%	(-) 0.2%	0.2%
Marzo	0.2%	0.2%	0.4%
Abril	0.2%	0.7%	1.3%
Mayo	0.3%	(-) 0.2%	0.0%
Junio	0.1%	0.2%	(-) 0.1%
Julio	0.4%	1.3%	0.3%
Agosto	(-) 0.5%	(-) 1.6%	0.8%
Septiembre	(-) 0.5%	(-) 0.4%	0.1%
Octubre	(-) 0.3%	(-) 1.0%	(-) 0.9%
Noviembre	(-) 0.5%	0.5%	0.9%
Diciembre	(-) 0.1%	(-) 0.3%	0.8%
2020			
Enero	(-) 0.3%	(-) 1.1%	(-) 1.1%
Febrero	(-) 0.2%	1.1%	0.7%
Marzo	(-) 0.2%	(-) 2.5%	(-) 0.6%
Abril	(-) 2.0%	(-) 32.2%	(-) 4.0%
Mayo	(-) 1.8%	10.6%	(-) 0.1%
Junio	0.4%	25.7%	2.5%
Julio	1.7%	4.9%	2.6%
Agosto	0.4%	0.5%	(-) 0.1%
Septiembre	0.8%	0.7%	0.7%
Octubre	0.5%	0.9%	1.2%
Noviembre	0.5%	(-) 0.3%	0.2%
Diciembre	0.4%	0.5%	1.8%

* Remuneraciones medias reales pagadas al personal ocupado. Fuente: series calculadas por métodos econométricos a partir de la Estadística del Programa IMMEX, con datos de Inegi (2021).

embargo, enero de 2020 comenzó con valores negativos respecto al mes precedente para los indicadores de personal ocupado, horas trabajadas y remuneraciones medias reales del personal ocupado, los cuales se agravaron por la declaración de la pandemia de COVID-19 y el establecimiento de las disposiciones sanitarias por parte del gobierno federal, en especial durante la Jornada Nacional de Sana Distancia (del 23 de marzo al 30 de mayo de 2020), que tomó como medidas base el confinamiento, el distanciamiento social y la suspensión de las actividades productivas consideradas no esenciales. Esta situación denotó la estrechez del desarrollo económico del país, donde están inmersas las empresas de la industria manufacturera, maquiladora y de servicios de exportación. Aunque el sector inició su recuperación de manera



paulatina a partir de junio de 2020, las cifras al final del año fueron negativas comparadas con 2019. Es por ello que las empresas, además de proteger a su personal contra el contagio de la COVID-19, deberán implementar estrategias que ayuden a mejorar su rentabilidad.

Agradecimiento

Agradecemos a la Red Nacional de Investigación de Universidades Tecnológicas y Politécnicas por hacer posible la publicación de este artículo.

Martha Angélica Ramírez Salazar

Universidad Politécnica de Zacatecas.
mramirez@upz.edu.mx

Felipe de Jesús Barrios Isunza

Universidad Politécnica de Zacatecas.
lily_barrios@hotmail.com

Omar Alejandro Guirette Barbosa

Universidad Politécnica de Zacatecas.
omarguirette@upz.edu.mx

Referencias específicas

Gómez Vega, M. C. (2004), “El desarrollo de la industria de la maquila en México”, *Problemas del Desarrollo. Revista Latinoamericana de Economía*, 35(138): 49-83. Disponible en: <<https://doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2004.138.7540>>, consultado el 17 de febrero de 2021.

Inegi (2021), “Indicadores de Establecimientos con Programa IMMEX. Cifras durante diciembre 2020”, *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Disponible en: <<https://www.inegi.org.mx/app/saladeprensa/noticia.html?id=6394>>, consultado el 15 de marzo de 2021.

Martínez Cuero, J. (2018), “La subcontratación como estrategia de rentabilidad para el capital transnacional: la industria maquiladora en Tijuana, 1990-2017”, *Análisis Económico*, 33(84):143-167. Disponible en: <<http://www.analiseconomico.azc.uam.mx/index.php/rae/article/view/281>>, consultado el 20 de octubre de 2020.

Silva, E. (2019), *Ley aduanera comentada*, 7.ª ed., México, PACJ.

José Leonel Larios Ferrer, Efrén Santamaría Islas y Juan Carlos Reyes García

Vulnerabilidad familiar en una población del estado de Hidalgo, antes y durante la pandemia de COVID-19

La pandemia de COVID-19 ha originado una crisis generalizada para toda la población, pero sobre todo ha afectado a los grupos más vulnerables en el aspecto económico. Una forma de medir esta situación en los hogares consiste en estudiar el bienestar familiar con base en su ingreso, antes y durante la crisis de salud. Encuestamos a una comunidad en Hidalgo para tener una mejor idea del panorama actual.

Antecedentes

Durante la crisis sanitaria originada por el virus H1N1 en 2009, México registró 54 000 casos confirmados de influenza, mientras que el número de fallecimientos ascendió a 398, lo cual significó una tasa de letalidad de sólo 0.73%, de acuerdo con cifras oficiales. En junio de ese año la Organización Mundial de la Salud (OMS) anunció el máximo nivel de alerta: fase seis, porque identificó que el virus se propagaba de persona a persona y que existían brotes comunitarios en dos países de una misma región y además en un tercero de una región distinta. Por ello, el brote de influenza en 2009 fue considerado una pandemia.

Además del impacto que dejó entre la población, los efectos negativos para la economía se dejaron ver sobre todo en la industria del entretenimiento en lugares cerrados y en el turismo. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal), las pérdidas económicas en México ocasionadas por la influenza durante 2009 se cifraron en \$57 000 millones de pesos, lo que significó 0.7% del producto interno bruto (PIB) de ese año. Después de esa epidemia se publicaron varios análisis, como el de Miguel Ángel Aparicio Ramírez y Gabriel Delgado Toral (2009), los cuales se enfocaron en la economía mediante comparaciones de variables macroeconómicas como la inflación y el tipo de cambio antes y durante la crisis sanitaria.

Una década después, con la aparición del virus SARS-CoV-2 a finales de 2019, hasta la fecha, 30 de mayo de 2022, en México se tiene registro de 5 772 032 casos de COVID-19 confirmados y 324 879 defunciones (tasa de letalidad de 5.6%), según datos del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt). Por su parte, el gobierno del estado de Hidalgo ha contabilizado 93 950 casos y un total de 8 420 defunciones, con una tasa de letalidad de 8.9%. La OMS clasificó el brote de COVID-19 como una pandemia el 30 de enero de 2020, y a la fecha la emergencia sanitaria continúa en todo el mundo.

La Cepal (2020) publicó un excelente análisis sobre los efectos económicos y sociales ante la pandemia de COVID-19 en América Latina y el Caribe. En el estudio se menciona que: “la COVID-19 tendrá efectos graves en el corto y el largo plazo en la oferta y la demanda a nivel agregado y sectorial, cuya intensidad y profundidad dependerán de las condiciones internas de cada economía, el comercio mundial, la duración de la epidemia y las medidas sociales y económicas para prevenir el contagio”. Lo anterior significa que las consecuencias de la pandemia serán diferentes en cada región, dependiendo de las medi-

das que adopte cada uno de los gobiernos nacionales y, dentro de cada país, las autoridades locales.

También se menciona que la pérdida de ingresos laborales se traducirá en un menor consumo de bienes y servicios, además de que puede llevar a muchos trabajadores a situaciones de pobreza. Los efectos para la sociedad se presentarían en diferentes ámbitos, como la salud (grandes brechas en el acceso a los sistemas de atención, por ejemplo), educación (efectos significativos en el aprendizaje, en especial de los estudiantes más vulnerables, entre otros), empleo y pobreza (el desempleo afectará de manera desproporcionada a los estratos más vulnerables y de ingresos medios), además del impacto económico en las micro, pequeñas y medianas empresas; asimismo, se deben considerar las consecuencias para la protección y cohesión social.

■ **Población vulnerable**

■ El Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (Coneval) y otros organismos clasifican a diferentes grupos de la población que se pueden considerar como sectores vulnerables por su



nivel de pobreza (determinada por su ingreso) y el número de carencias sociales, las cuales son: rezago educativo, atención a la salud, seguridad social, calidad y espacio de la vivienda, acceso a servicios básicos en la vivienda y la alimentación (Coneval, 2019). Las personas en los grupos vulnerables por carencias sociales son aquellas que tienen una o más carencias sociales, pero cuyo ingreso es igual o superior a la línea de pobreza por ingresos; éstos se consideran los grupos más vulnerables, pues una pequeña disminución en su ingreso puede provocar que caigan en situación de pobreza. Por su parte, una persona se considera en nivel de pobreza cuando tiene al menos una carencia social y su ingreso es menor a la línea antes mencionada, con el cual debe costearse las necesidades básicas (productos de la canasta básica, entre ellos los alimentos). Dentro de este grupo se encuentran aquellas personas catalogadas en pobreza extrema, cuando presentan tres o más carencias sociales y su ingreso es menor al costo de la canasta alimentaria (también llamada línea de pobreza extrema por ingresos).

Estos grupos se consideran vulnerables ante la pérdida de empleos y la disminución de ingresos, pues los riesgos más importantes se encuentran, entre otros, en la reconfiguración de la distribución del ingreso de los hogares. Esta clasificación se resume en la Figura 1,

donde se muestran otros grupos de la población total complementarios a los ya mencionados. Según información del Coneval (2019), la composición de estos sectores en México con relación al total de la población en 2018 era de 29.3% para los grupos vulnerables por carencias sociales y 41.9% en el nivel de pobreza (véase la clasificación completa en la Figura 2).

En el caso de Hidalgo, para ese mismo año, el sector vulnerable por carencias sociales correspondía a 36.9%, mientras que 43.8% estaba en nivel de pobreza; ambas cifras superaban la media nacional (véase la Figura 3). Sin embargo, cabe mencionar que, de 2008 a 2018, la población de Hidalgo en situación de pobreza o de vulnerabilidad disminuyó 2.6 puntos porcentuales, al pasar de 89.1% a 86.5%. En ese mismo periodo, el porcentaje de población con un ingreso inferior a la línea de pobreza disminuyó 11 puntos porcentuales (Coneval, 2020, pp.16 y 54).

Ingreso familiar de grupos vulnerables y COVID-19

En lo que respecta a la variable que describe el bienestar familiar, en el presente estudio se optó por seguir la propuesta de Janet Victoria Nabarrete y Alicia Sylvia Gijón Cruz (2018) de basarse en el ingreso familiar, definido como el presupuesto con el que cuenta una familia para tener bienestar. Encues-

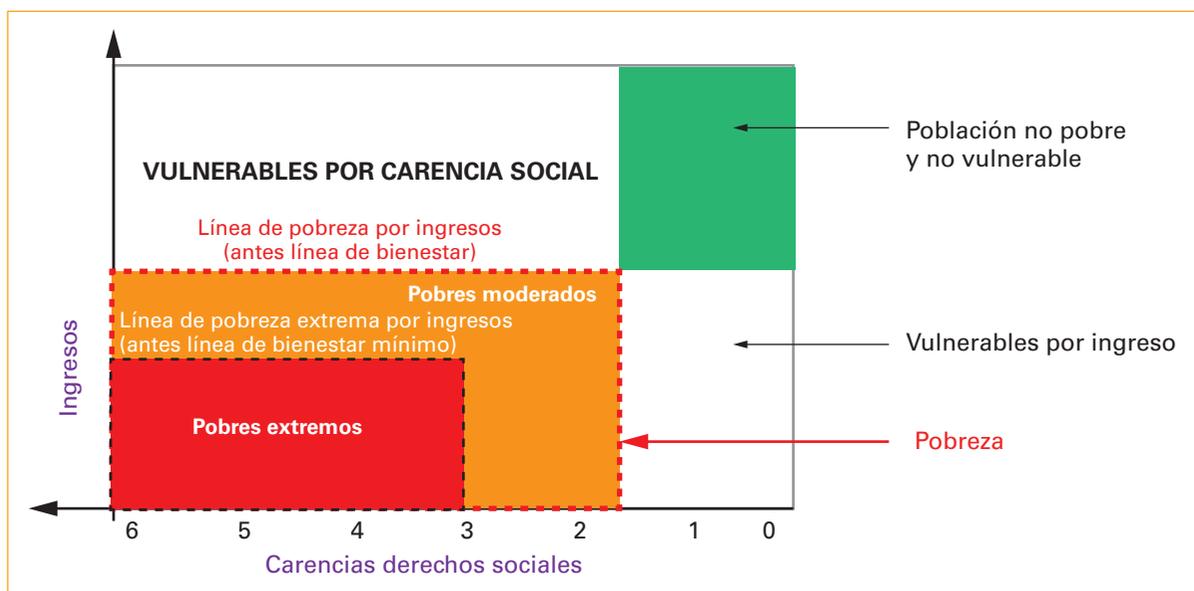


Figura 1. Metodología para la medición de la pobreza y vulnerabilidad. Fuente: Coneval (2020, p. 102).

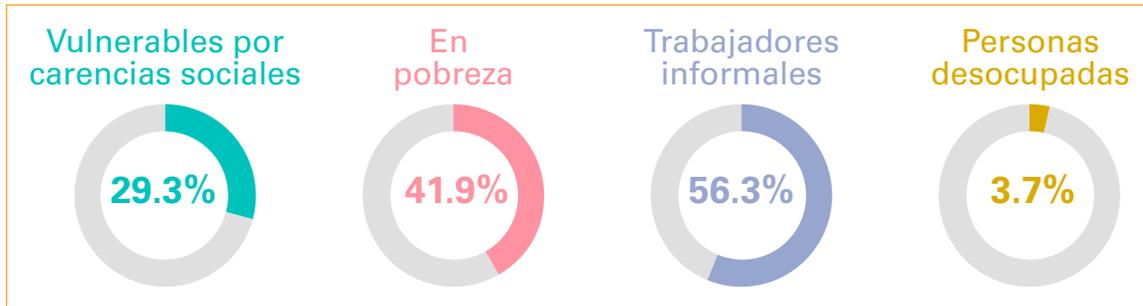


Figura 2. Grupos vulnerables en cifras para México, 2018. Fuente: Coneval (2019, p. 1).

tas levantadas recientemente, como las del “Impacto de la COVID-19 en el bienestar de la población mexicana”, a cargo del Instituto de Investigación para el Desarrollo con Equidad (Equide) de la Universidad Iberoamericana, señalan que uno de cada tres hogares reportó una pérdida de 50% o más de sus ingresos respecto a febrero de 2020; 61.6% de los hogares tuvo un ingreso menor en marzo, comparado con febrero, con un promedio de 48% en dicha caída. Además, se reveló que 37.7% de los hogares más vulnerables contestaron que uno o más de sus integrantes perdieron su empleo o alguna otra fuente de ingreso.

No obstante, son pocos los trabajos en la literatura que han estudiado el bienestar familiar durante la pandemia por COVID-19 a escala local y regional, sobre todo en los grupos vulnerables. Por ejemplo,

Ricardo Fuentes Nieva (2020) hace ver la importancia de atender a esta población en tiempos de pandemia, pues millones de personas dependen de la economía informal y no recibirán apoyos en el corto plazo, al menos no por parte del gobierno federal. Es importante señalar que en nuestro país existen 52.4 millones de personas que viven en pobreza y 45.3 millones que son vulnerables, pero sólo 22 millones forman parte de los padrones de los programas sociales vigentes.

Por ello, se considera necesario estudiar los efectos de la pandemia por la COVID-19 sobre el bienestar familiar con base en el ingreso de los sectores vulnerables en diferentes áreas del país. Por ejemplo, nuestro grupo desarrolló este trabajo en el pueblo de San Ildefonso, municipio de Tepeji del Río, en

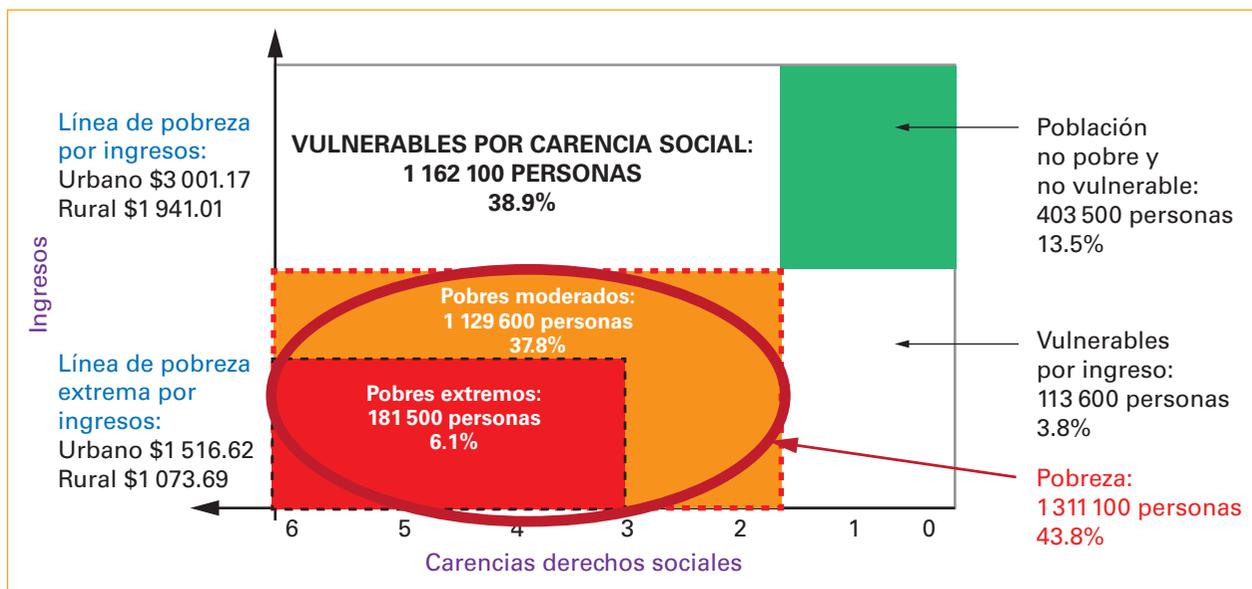


Figura 3. Grupos vulnerables en cifras para Hidalgo, 2018. Fuente: Coneval (2020, p. 15).

Tabla 1. Resultados generales obtenidos de las 87 encuestas validadas.

Variable	Observaciones generales	
	Antes	Durante
Número de trabajadores del hogar	Existe un mayor porcentaje: dos personas del hogar trabajan (49% del total).	Se reduce a 47% del total de hogares donde dos personas trabajan y surge un grupo en el que cuatro o más personas del hogar laboran, con una participación de casi 3% del total.
Número y ganancias de los negocios	Existen menos negocios con mayores ganancias: 18% de las personas encuestadas tiene un negocio y la mitad de éstos obtiene ganancias mayores de \$4 000 pesos.	Existen más negocios, pero con menores ganancias: 24% de las personas encuestadas tiene un negocio, pero solamente 31% obtiene ganancias superiores a \$4 000 pesos.
Situación laboral y sueldos	En 80.5% de los casos, los jefes de familia son empleados y tienen salarios mayores (35% de las personas encuestadas tiene un salario mayor de \$4 000 pesos).	La proporción de hogares con jefes de familia empleados se reduce a 66.7% y bajan los salarios, ya sea por reducción o por una jornada laboral menor (ahora solamente 28% de las personas encuestadas gana más de \$4 000 pesos).
Tipo y retribución de actividades con ingreso	Existe mayor comercio y las retribuciones son más altas: 24% de las personas encuestadas se dedica al comercio y solamente 1% alude que realiza otra actividad no especificada; además, 31% dice tener un ingreso de \$3 000 pesos o más.	Hay menor comercio y se diversifican otras actividades con retribuciones más bajas: ahora solamente 20% se dedica al comercio, mientras que otras actividades no especificadas presentan 36% de participación; además, 27% expresa tener ingresos de \$3 000 pesos o más.
Apoyos del gobierno	Solamente 5.7% manifestó recibir un apoyo económico gubernamental.	La cifra baja a 3.4% que dijo recibir un apoyo económico gubernamental.
Remesas	De las personas encuestadas, 1.1% manifestó recibir este tipo de apoyos.	Se mantiene 1.1% en esta variable.
Número y monto de préstamos	Entre las personas encuestadas, 10.3% pidió préstamos, de los cuales 87% fueron por montos mayores de \$1 000 pesos.	Se mantiene 10.3% en este rubro, pero 100% de los préstamos son mayores de \$1 000 pesos.
Número y monto de donaciones (ingresos no tomados en cuenta en los anteriores)	Solamente 3.4% de las personas encuestadas recibió donaciones monetarias, todas menores de \$2 000 pesos.	Se mantiene 3.4% en esta variable, pero ahora 66% de las donaciones son de \$3 000 pesos o más.

el estado de Hidalgo. En esta comunidad indígena de alta marginación,¹ la mayoría de los habitantes se dedica al comercio informal, a la música y a la albañilería, entre otros oficios. El objetivo general de la investigación fue analizar el bienestar familiar, antes y después de la crisis originada por la pandemia de COVID-19.

Metodología

Aplicamos encuestas mediante un formulario de Google (debido a las medidas de distanciamiento social, no se hizo de manera presencial); hicimos un primer análisis con estadística descriptiva y luego uno de tipo longitudinal (análisis entre dos tiempos diferentes) con un *software* estadístico que hace uso de diferentes pruebas para muestras relacionadas (mis-

ma muestra, diferente tiempo). La muestra no fue al azar, sino que se eligió un tipo de población según las variables socioeconómicas. El tamaño de la muestra se obtuvo con base en lo estipulado por Humberto Gutiérrez Pulido y Román de la Vara Salazar (2008) para una población finita: a partir del dato de la existencia de 984 viviendas particulares habitadas en la comunidad de San Ildefonso en 2010, según cifras del Consejo Nacional de Población (Conapo, 2011), y una población económicamente activa de 92% para el primer cuatrimestre de 2020, se llega a un universo de 906 viviendas. Las encuestas se aplicaron durante noviembre de 2020 a personas mayores de edad pertenecientes a 107 familias; al final resultaron 87 encuestas efectivas, suficientes para tener un nivel de confianza de 95 por ciento.

Resultados

Con las encuestas validadas, se obtuvieron los datos generales (véase la Tabla 1). De estos datos cabe

¹ El grado de marginación de la localidad pasó de ser media en 2005 a ser alta en 2010. Obtenido de: <<http://www.microrregiones.gob.mx/catloc/contenido.aspx?refnac=130630011>>, consultado el 25 de septiembre de 2020.

resaltar que algunas familias emprendieron nuevos negocios para subsistir, lo que redujo las ganancias de los negocios ya existentes.

Nuestros resultados mostraron una diferencia significativa entre el bienestar familiar antes y durante la pandemia, con base en las siguientes variables relacionadas con el ingreso: 1) cantidad de trabajadores en los hogares; y 2) sueldo e ingreso por actividades diversas de la población.

■ Conclusiones

■ A partir del análisis de la población vulnerable incluida en el presente estudio, se observó la pérdida de empleos durante la pandemia de COVID-19 y, en algunos casos, reducciones de salarios o de jornadas de trabajo. También destaca la participación de más negocios, pero con menores ganancias durante la pandemia; así como un menor comercio y una mayor diversificación de las actividades, pero con retribuciones más bajas. Este tipo de trabajos demuestra la utilidad y pertinencia de estudiar el ingreso familiar y sus consecuencias sobre el bienestar en los sectores vulnerables de la sociedad mexicana ante situaciones como la actual pandemia. En el estudio pudimos ver las distintas formas en que las familias diversificaron su modo de vida para adaptarse mejor a las circunstancias adversas generadas por la pandemia de COVID-19.

Agradecimiento

Agradecemos a la Red Nacional de Investigación de Universidades Tecnológicas y Politécnicas por el apoyo otorgado en una primera revisión del trabajo.

José Leonel Larios Ferrer

Universidad Politécnica de la Energía.
leonel.larios@upenergia.edu.mx

Efrén Santamaría Islas

Universidad Politécnica de la Energía.
efren.santamaria@upenergia.edu.mx

Juan Carlos Reyes García

Universidad Politécnica de la Energía.
juan.reyes@upenergia.edu.mx

Referencias específicas

- Aparicio Ramírez, M. A. y G. Delgado Toral (2009), "México: la economía antes y después de la influenza", *Economía Informa*, 359:185-189.
- Berlanga-Silvente, V. y M. J. Rubio-Hurtado (2012), "Clasificación de pruebas no paramétricas. Cómo aplicarlas en SPSS", *Rev. REIRE*, 5(2):101-113.
- Cepal (2020), *América Latina y el Caribe ante la pandemia del COVID-19: efectos económicos y sociales*, Informe #1, Santiago de Chile, Comisión Económica para América Latina y el Caribe.
- Coneval (2019), "Grupos vulnerables e históricamente discriminados en el contexto de la emergencia sanitaria provocada por el virus SARS-CoV-2 (COVID-19)", *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx/Evaluacion/IEPSM/Documents/CPP_2021/Info_Vulnerables_COVID.pdf>, consultado el 26 de mayo de 2021.
- Coneval (2020), "Informe de pobreza y evaluación 2020: Hidalgo", *Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social*. Disponible en: <https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Documents/Informes_de_pobreza_y_evaluacion_2020_Documentos/Informe_Hidalgo_2020.pdf>, consultado el 27 de mayo de 2021.
- Flores-Ruiz, E., M. G. Miranda-Novales y M. Á. Villasís-Keever (2017), "El protocolo de investigación VI: cómo elegir la prueba estadística adecuada. Estadística inferencial", *Rev Alerg*, 64(3):364-370.
- Fuentes Nieva, R. (2020), "México y el coronavirus: pasividad gubernamental en una sociedad desigual", *Análisis Carolina*. Disponible en: <<https://www.fundacioncarolina.es/wp-content/uploads/2020/04/AC-16-2020.pdf>>, consultado el 17 de septiembre de 2020.
- Gutiérrez Pulido, H. y R. de la Vara Salazar (2008), *Análisis y diseño de experimentos*, México, McGraw Hill.
- Nabarrete, J. V. y A. S. Gijón Cruz (2018), "Análisis de la economía familiar y su impacto en el bienestar familiar en comunidades mixtecas del estado de Oaxaca", en S. de la Vega Estrada y K. Rodríguez Crucita (coords.), *Desigualdad regional, pobreza y migración*, México, Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional, pp. 580-601.

Noticias de la Academia Mexicana de Ciencias



Transmisiones recientes de charlas virtuales

En el marco de la pandemia por la COVID-19, la Academia Mexicana de Ciencias (AMC) ha continuado con varios ciclos de conferencias virtuales en sus canales de redes sociodigitales.

Conferencias virtuales de la AMC

Este programa dio inicio en julio de 2020 y ha incluido un gran número de investigadores de temas especializados con relevancia científica y para el país.

- “Más allá de la molécula. Haciendo química al estilo Lego”, con Jesús Valdés Martínez del Instituto de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México, 23 de febrero de 2022, disponible en: <https://youtu.be/FBS38Ag4IAI>.
- “El Inmegen a dos años de la pandemia por COVID-19”, con Luis Alonso Herrera del Instituto Nacional de Medicina Genómica (Inmegen), 30 de marzo de 2022, disponible en: <https://youtu.be/mYBDZuNrrq4>.
- “Degustación de petróleo: ¿quiénes son los invitados en el Golfo de México?”, con María Leopoldina Aguirre Macedo del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, unidad Mérida, 27 de abril de 2022, disponible en: <https://youtu.be/KN-hFWmw9uc>.





- “¿Declive hegemónico de Estados Unidos? De Obama a Biden”, con José Luis Valdés Ugalde del Centro de Investigaciones sobre América del Norte de la Universidad Nacional Autónoma de México, 25 de mayo de 2022, disponible en: <<https://youtu.be/MseZjmXBNaE>>.
- “Microplásticos en playas: realidad y percepción”, con Arely Areanely Cruz Salas de la Universidad Autónoma Metropolitana, 7 de junio de 2022, disponible en: <https://youtu.be/8F_Yvqmdqlg>.

Charlas con autores de la revista Ciencia de la AMC

Participación de autores que han contribuido en los últimos números de la revista.

- “Vínculo de la especie humana con la naturaleza”, con Lorena Paola Herrera del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina, 22 de marzo de 2022, disponible en: <<https://youtu.be/31tcTzG-xm8>>.
- “El Caribe y su contaminación por microplásticos”, con Dalila Aldana Aranda del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, unidad Mérida, 19 de mayo de 2022, disponible en: <<https://youtu.be/UTkCs7bRLvk>>.
- “Biorremediación de la contaminación por plásticos”, con Carolina Peña Montes del Tecnológico Nacional de México, campus Veracruz, 31 de mayo de 2022, disponible en: <<https://youtu.be/UnPfrk8cqCg>>.

Tu mundo con ciencia, conferencias para jóvenes

- Ciclo de conferencias impartidas por exganadoras de las Becas para Mujeres en la Ciencia L’Oréal-Unesco-AMC. Se lleva a cabo el segundo jueves de cada mes y se transmite por los canales de las redes sociodigitales de la AMC. Las conferencias están dirigidas a jóvenes de bachillerato, para fomentar las vocaciones científicas.
- “¿Sabes cómo podemos ayudar a nuestro planeta ante el cambio climático?”, con Erika Bustos Bustos del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, 12 de mayo de 2022, disponible en: <<https://youtu.be/JClv-w8i9Xw>>.
- “Los materiales que han cambiado al mundo”, con Ana Laura Martínez Hernández del Tecnológico Nacional de México, campus Querétaro, 16 de junio de 2022, disponible en: <<https://youtu.be/7iA-G1AnVp0>>.





Figura 1. Medalla del Senado francés.

Reconocimientos

Medalla del Senado de Francia a Carlos Bosch Giral

El pasado 7 de junio, el doctor Carlos Bosch Giral, director del programa de La Ciencia en tu Escuela (LCE), fue distinguido con la medalla del Senado de Francia por su trayectoria profesional y, en particular, por su labor al frente de LCE. La ceremonia se llevó a cabo en la sede del Senado francés, en París, en el marco de la novena edición de la Semana de América Latina y el Caribe (SALC 2022) bajo el tema “Francia-América Latina y el Caribe: ¿Qué caminos hacia un futuro más próspero, solidario y responsable, principalmente a través de la educación?”.



Figura 2. Gérard Larcher, presidente del Senado francés; el galardonado, Carlos Bosch Giral, y Blanca Jiménez, embajadora de México en Francia.

Nombramiento de la Orden del Imperio Británico a Alejandro Madrigal

El doctor Alejandro Madrigal, miembro correspondiente de la AMC y director retirado del Instituto de Investigación de la Fundación Británica Anthony Nolan, recibió de la Reina Isabel II el honor de Oficial de la Orden del Imperio Británico (OBE, que significa *Officer of the Most Excellent Order of the British Empire*), una de las categorías de un sistema de reconocimiento a la labor extraordinaria de civiles y miembros de las fuerzas armadas. Madrigal es una eminencia mundial en el trasplante de médula ósea, especialista en hematología, en trasplante de células madre y en el combate al cáncer.



Figura 3. Alejandro Madrigal. Fotografía: Mariana Castineiras/BBC Mundo.

ACTIVIDADES 2022

JULIO

1 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Integración social a través del diseño
Dra. Berthana María Salas Domínguez
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Diseño, discapacidad e inclusión
Dr. Elías Barón Levin Rojo
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

5 MARTES DE ARTES VISUALES EN LÍNEA
Remembranzas con el Colectivo Interspecifics
Colectivo Interspecifics
20:00 h / FB Live
Cultura UAM
Galería Metropolitana UAM

7 JUEVES DE ARTES ESCÉNICAS EN LÍNEA
Taller de guitarras UAM Iztapalapa
Mtro. Rodrigo Toro
20:00 h / FB Live
@teatrocasadelapaz
@CulturaUAM.mx
Galería Metropolitana UAM

8 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Políticas públicas y aspectos sociales para el desarrollo de poblaciones marginadas
Dra. María del Pilar Berrios Navarro
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Pueblos urbanos
Dra. Lucía Álvarez Enriquez
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

12 MARTES UAM DE HUMANIDADES
La vida en la diversidad: experiencias en México
Conversatorio: Panorama laboral para personas con discapacidad en CDMX
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

14 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
La riqueza natural de México: intereses privados y políticas públicas
Conversatorio: Lito en México: entre los intereses privados e internacionales y la política
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

JUEVES DE ARTES ESCÉNICAS EN LÍNEA
Tan fácil es morir
Compañía Nacional de Teatro
20:00 h / FB Live
@teatrocasadelapaz / @CulturaUAM.mx

15 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Gentrificación, conflictos urbanos
Dr. Adrián Hernández Cordero
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Desplazamiento
Dra. Margarita del Carmen Zarate Vidal
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

18 CONVERSATORIO
Vidas que importan.
Valentina, la lucha trans
Valentina, luchadora social
17:00 h / Presencial y FB Live
Casa Galván

19 MARTES UAM DE HUMANIDADES
La vida en la diversidad: experiencias en México
Conversatorio: Representaciones hegemónicas de la afrodescendencia en medios de comunicación
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

21 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
La riqueza natural de México: intereses privados y políticas públicas
Minería y extracción de vida en México: riqueza material y pobreza normativa
16:00 h / Presencial
Rectoría General UAM

JUEVES DE ARTES ESCÉNICAS EN LÍNEA
Vespier
Compañía Nacional de Teatro
20:00 h / FB Live
@teatrocasadelapaz / @CulturaUAM.mx

22 CONCIERTO
Centro Cultural Ollin Yoliztli
presenta Música Barroca
Soprano Eugenia Ramírez
17:00 h / Presencial
Casa del Tiempo

CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Megalópolis y sustentabilidad
Dr. Alfonso Rivas Cruces
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Proyectos sustentables
Dra. Adriana Larralde Corona
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

26 MARTES DE ARTES VISUALES EN LÍNEA
Conversación con Carlos Aguirre
Carlos Aguirre, artista contemporáneo
20:00 h / FB Live; Cultura UAM
Galería Metropolitana UAM

MARTES UAM DE HUMANIDADES
La vida en la diversidad: experiencias en México
Conversatorio: Pueblos originarios ante crisis ambiental e impacto para la salud
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

27 CONCIERTO
Noche de Museos.
La música como medicina
Elizabeth Santillán
19:00 h / Presencial
Casa de la Primera Imprenta de América

28 MESA DE ANÁLISIS
El Café de Metropolitana.
Una charla sobre NFT.
¿La nueva práctica artística?
David Pau
17:00 h / Presencial
Galería Metropolitana UAM

JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
La riqueza natural de México: intereses privados y políticas públicas
Conversatorio: ¿El agua es pública o privada?: la industria en acción
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

TRANSMEDIA
Media Lab
Musas Sonideras y Las Pijamas
17:00 h / Presencial
Casa Galván

29 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Creatividad y espacio urbano
Arq. Eduardo Peón Velázquez
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Asentamientos urbanos y espacios públicos
Mtro. Amador Romero Barrios
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

TODOS LOS VIERNES DE JULIO:

CÁPSULAS SONORAS
Kuikail La Rola
20:00 h / FB Live
Casa Galván UAM

SÁBADOS DE JULIO:

CICLO DE CINE
Fin de cine. Cortometrajes con perspectiva de género
Maricruz Gómez López, jefa de la Unidad de Prevención y Atención contra la Violencia de Género UAM-X
20:00 h / FB Live
Casa Galván UAM

AGOSTO

2 MARTES UAM DE HUMANIDADES
La vida en la diversidad: experiencias en México
Conversatorio: Salir del clóset en el ámbito laboral: ¿un privilegio o un derecho?
16:00 h / Presencial
Rectoría General UAM

4 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
La riqueza natural de México: intereses privados y políticas públicas
Conversatorio: Sustentabilidad y soberanía alimentaria: en la búsqueda del buen comer y el hambre cero
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

5 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Big data
Dr. Christian Lemaître León
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Seguridad Digital
Ing. Irving Ariel Díaz Lago
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

9 MARTES UAM DE HUMANIDADES
Conflictos globales actuales: sociedad, política y economía
Conversatorio: El estado de la representatividad democrática en América Latina
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

11 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
Cuando el futuro nos alcance - Espacios virtuales y nuevas tecnologías informáticas
Conversatorio: Bitcoin: ¿la moneda del futuro?
16:00 h / Presencial
Rectoría General UAM

12 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Educación para el futuro
Dra. Erika Cecilia Castañeda Arredondo
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM
Tecnologías de la información para una sociedad más justa
Mtro. Miguel Ángel Gallegos Cárdenas
10:30 h / UAM Radio 94.1 FM

16 MARTES UAM DE HUMANIDADES
Conflictos globales actuales: sociedad, política y economía
Conversatorio: Declarar la guerra en contra de mi peor enemigo que es... : Ucrania, Rusia y OTAN
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

18 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
Cuando el futuro nos alcance - Espacios virtuales y nuevas tecnologías informáticas
Conversatorio: Metaverso: ¿evolución de las relaciones humanas?
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

19 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
(Décima segunda temporada)
La Hidrosfera y los problemas contemporáneos alrededor del agua
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM

23 MARTES UAM DE HUMANIDADES
Conflictos globales actuales: sociedad, política y economía
Conversatorio: Hecho en China: cadenas de valor y producción masiva en Asia
16:00 h / Presencial
Rectoría General UAM

25 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
Cuando el futuro nos alcance - Espacios virtuales y nuevas tecnologías informáticas
Conversatorio: Cómo ganar dinero con un meme: NFT y arte digital
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

26 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Profundidades del océano y su relevancia medioambiental
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM

30 MARTES UAM DE HUMANIDADES
Conflictos globales actuales: sociedad, política y economía
Conversatorio: Crisis humanitarias: migración y desplazamientos forzados en América Latina
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

SEPTIEMBRE

1 JUEVES UAM DE INTERDISCIPLINA
Cuando el futuro nos alcance - Espacios virtuales y nuevas tecnologías informáticas
Conversatorio: Diálogo cibernético: el uso de bots en la UAM
18:30 h / FB Live
@ConocimientoUAM

9 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Los últimos glaciares en México: ecoturismo y las áreas naturales protegidas
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM

30 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Fauna marina y aumento de contaminantes
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM

2 CIENCIA ABIERTA AL TIEMPO
Los cenotes en México, descubrimientos arqueológicos y legado histórico
10:00 h / UAM Radio 94.1 FM



@uam.mx



@instauam



@Yo_SoyUAM

#SoyUAM

www.uam.mx

En nuestro próximo número
de octubre-diciembre de 2022:

Epigenética



Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

